

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ESTRATIGRAFÍA



TESIS DOCTORAL

Hidrología y producción de sedimentos a escala decenal y secular de una cuenca mediterránea en respuesta a la variabilidad climática y a los cambios ambientales

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Xavier Rodríguez Lloveras

Directores

Gerardo Benito Ferrández
Yolanda Sánchez Moya

Madrid, 2014

Hidrología y producción de sedimentos a escala decenal y secular de una cuenca mediterránea en respuesta a la variabilidad climática y a los cambios ambientales



Xavier Rodriguez Lloveras

Tesis Doctoral

Madrid, 2014

Departamento de Geología
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

Departamento de Estratigrafía
Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

Tesis Doctoral

Hidrología y producción de sedimentos a escala decenal y secular de una cuenca mediterránea en respuesta a la variabilidad climática y a los cambios ambientales.

Memoria presentada para optar al grado de Doctor en Geología e Ingeniería Geológica,
presentada por:

Xavier Rodríguez Lloveras

Bajo la dirección de los Investigadores:

Gerardo Benito Ferrández

Profesor de Investigación, Departamento de
Geología, Museo Nacional de Ciencias Naturales,
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

Yolanda Sánchez Moya

Profesora Titular, Departamento de Estratigrafía,
Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad
Complutense de Madrid

Madrid, 2014

Resumen

La respuesta de los extremos hidrológicos al cambio climático ha sido uno de los temas centrales de los trabajos del IPCC desde 1988, pero solamente en el último de sus informes (IPCC, 2014) se ha considerado el impacto del cambio global en la producción de sedimentos. Las principales incertidumbres que se plantean en dicho informe residen, por un lado en la carencia de series largas de registros de escorrentía y sedimentos, y por otro, la dificultad de separar la señal climática (régimen de lluvia) de la generada por los cambios en los usos del suelo y en la vegetación, que afectan a la escorrentía de las cuencas.

Esta tesis doctoral plantea un nuevo enfoque metodológico basado en (1) obtener registros hidro-sedimentarios a largo plazo partiendo de evidencias geológicas (geomorfológicas, sedimentarias), datos documentales (descripciones de avenidas extremas) y registros instrumentales (lluvia), y (2) analizar la respuesta hidro-sedimentaria a las variaciones climáticas y a los cambios de usos del suelo mediante un modelo hidrológico distribuido (TETIS-SED).

La zona de estudio forma parte de la cuenca alta del río Guadalentín, una cuenca mediterránea no aforada con un marcado comportamiento torrencial. Situada en el suroeste de la Península Ibérica, entre las provincias de Murcia y Almería, presenta una extensión algo superior a los 400 km², un desnivel total de ~1300 m, y se encuentra limitada en su punto más bajo por la presa de Valdeinfierno. La cuenca de estudio se caracteriza por la escasez de registros hidrológico-sedimentarios que, junto con su comportamiento torrencial, se puede considerar representativa de un gran número de cuencas mediterráneas de montaña. La respuesta hidro-sedimentaria de la cuenca se ha estudiado a distintas escalas temporales y de resolución del registro: (a) escala geológica desde principios del Holoceno hasta la actualidad a una resolución centenaria (capítulo 3); (b) a escala histórica con resolución anual-decenal (capítulo 6); (c) a escala instrumental con resolución diaria (capítulo 4); y (d) a escala de proyección futura de acuerdo a escenarios de cambio climático y de gestión del suelo con resolución mensual-anual (capítulo 5). Esta visión de largo plazo con distintas resoluciones de análisis permite comprender la dinámica hidrológica y sedimentaria a lo largo de la historia de la cuenca, y permite entender mejor las tendencias y limitaciones de las proyecciones futuras, incluyendo las incertidumbres asociadas a los modelos de cambio climático y global. Este ensayo metodológico combinando evidencias geológicas de campo, técnicas SIG y Láser Escáner Terrestre, y modelización hidrológica y sedimentaria basada en series climáticas pasadas, instrumentales y futuras, se puede aplicar con garantías a otras cuencas con características similares.

El estudio del comportamiento hidro-sedimentario a diferentes escalas temporales implica una aproximación multidisciplinar al problema, cuyos sesgos y particularidades dependen del tipo de registro analizado. Por esta razón, la metodología seguida a lo largo de la presente tesis doctoral se ha adaptado en cada intervalo a la extensión del periodo analizado (desde varios

milenarios a pocas décadas), y a la información y datos disponibles en cada uno de dichos periodos (geológico, documental e instrumental).

La producción de sedimentos a escala milenaria (Holoceno) ha sido determinada aplicando métodos retrodictivos que permiten inferir a partir de evidencias sedimentarias y geomorfológicas el comportamiento hidro-sedimentario en respuesta a la variabilidad climática y la intervención humana en el territorio. Por su parte, el estudio de las tasas de producción de sedimento a escala histórica e instrumental se han basado en la aplicación del método inductivo donde a partir de observaciones y medidas de campo se ha elaborado un modelo de comportamiento hidro-dinámico generalizable a ríos mediterráneos. Los datos de partida u observaciones de carácter documental e instrumental han sido utilizados como fuente de datos para la implementación del modelo hidro-sedimentario distribuido TETIS-SED. Este modelo ha permitido asemejar y reconstruir los eventos hidrológicos extremos y, de este modo, cuantificar los factores principales que intervienen en la producción de sedimentos. Respecto a la proyección futura, el comportamiento hidro-sedimentario de la cuenca se plantea en función de distintos escenarios de cambio global. Dichos escenarios han sido subdivididos en escenarios de evolución climática y escenarios (configuraciones) de gestión y uso de los suelos. Los escenarios de proyección climática se han obtenido de los modelos publicados por el IPCC (2007b) escalados de acuerdo al *downscaling* estadístico de las series meteorológicas locales. Por su parte, las configuraciones de usos del suelo futuros se han estimado respecto a situaciones demográficas y socio-económicas plausibles, teniendo en cuenta las condiciones actuales y las tendencias políticas, demográficas y económicas. Las múltiples combinaciones de escenarios climáticos y configuraciones de usos del suelo han sido implementadas en el modelo TETIS-SED, lo que ha resultado en un rango de posibles tendencias futuras en la hidrología, la erosión y la producción de sedimentos en la cuenca.

Los resultados de las distintas simulaciones de la cuenca de Valdeinfierno utilizando el modelo TETIS-SED, han demostrado que esta herramienta supone una adecuada aproximación a la caracterización de la cuenca, mostrando una buena precisión, ligeramente conservadora puesto que tiende a subestimar los resultados de eventos hidrológicos extremos y de la erosión. La mejora de los resultados de simulación obtenidos a las distintas escalas espaciales de trabajo planteadas (desde sub-cuenca al conjunto de la cuenca), han sido posible gracias a la calibración y validación del modelo TETIS-SED utilizando evidencias estratigráficas del sedimento producido durante eventos individuales de escorrentía, y acumulados en diques forestales (presas) de retención de sedimento y en el embalse de Valdeinfierno.

La correspondencia de resultados del modelo hidrológico con los datos de observación indica la fiabilidad del primero. Por ello es posible aplicar sobre el modelo las variaciones en la clima previstas en tres escenarios (B1, A1B y A2) y 17 modelos climáticos del IPCC (2007b). Se ha determinado que estas variaciones afectan a la recurrencia (reducción) y magnitud (aumento) de los eventos extraordinarios en la cuenca de estudio, condicionando su aporte hídrico y sus efectos en la erosión a lo largo del siglo XXI. No obstante, la aplicación de la información disponible sobre la hidrología referente a los siglos XIX y XX, comparada con los modelos

globales de reanálisis de circulación climática, ha permitido determinar que el área de estudio está fuertemente influenciada por las condiciones locales de circulación atmosférica aunque también responde a las variaciones climáticas a nivel global. Esta fuerte dependencia climática de condiciones locales, combinada con la baja frecuencia de los extremos de precipitación durante el periodo de referencia (1961-1990) utilizado para el cálculo de la serie de precipitación extrema en el periodo de proyección climática (2010-2099), implica que los resultados calculados de la proyección climática deben ser considerados con reservas. Esta apreciación no afecta a la relación entre distintos escenarios de proyección climática o de configuraciones de usos del suelo (tan solo sus valores absolutos). Por consiguiente, las distintas proyecciones representan una herramienta de gran utilidad en la selección de políticas de gestión ambiental en base a escenarios orientados a minimizar, en medida de lo posible, los procesos de erosión en la cuenca de estudio

Los datos de distintas fuentes (sedimentaria, documental e instrumental) conjuntamente con el modelo hidrológico y de transporte de sedimentos han permitido caracterizar la cuenca de Valdeinfierno como una cuenca altamente dependiente de los extremos hidrológicos, durante los que se producen las principales tasas de erosión y transporte de sedimentos determinadas por la magnitud del fenómeno. Los registros aluviales Holocenos de la cuenca de estudio indican que un comportamiento hidrológico y sedimentario similar se ha producido durante los últimos 3000 años. Dichos registros muestran que la agradación aluvial se concentra en determinados intervalos temporales de varias décadas de duración y que, climáticamente, coinciden con momentos fríos y/o de transición climática que pueden ser magnificados por la ocupación humana del territorio.

La gestión y usos de los suelos de la cuenca de Valdeinfierno han demostrado ser un elemento muy determinante en la hidrología de la cuenca, y especialmente en la erosión y el transporte de sedimento. Se ha observado que mientras la hidrología de la cuenca es dependiente del porcentaje de ocupación en área de cada uno de los usos del suelo considerados, el transporte de sedimentos y la erosión dependen en mayor grado de su distribución espacial, principalmente en referencia a la pendiente local sobre la que se distribuye cada uno de los usos. La diferencia de comportamiento de la hidrología y la erosión implican que el escenario de usos óptimo para la conservación de los suelos, puede diferir del escenario de usos óptimo para minimizar el volumen de agua generado durante las inundaciones. Las distintas configuraciones de usos han demostrado que, en general, una mayor ocupación de los suelos con vegetación natural densa, conlleva una mayor conservación de suelos y una reducción en el potencial de las avenidas. No obstante, una sobreabundancia de terreno con vegetación natural disminuye en gran medida la hidrología y la actividad humana en la cuenca. Por lo tanto, se concluye que la configuración de usos del suelo óptima (más sostenible) debe combinar un avanzado estado de evolución de los ecosistemas naturales en las laderas, junto con técnicas agrícolas orientadas a la conservación de los suelos en las áreas de cultivo de bajas pendientes, como el barbecho verde o los campos multi-cultivo. Desde el punto de vista práctico, se ha señalado que la gestión de los usos del suelo supone una de las principales herramientas disponibles frente al cambio global a corto y

medio plazo, debido a que sus efectos locales sobre la erosión y la hidrología resultan más inmediatos que otras acciones orientadas a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero.

Abstract

The response of hydrological extremes to climate change has been one of central topics of the IPCC publications (from 1988). However, only in the last report (IPCC, 2014) the impact of global change on sediment production has been considered. The main uncertainties that arise therein are: (1) the lack of long time series of runoff and sediment records, and (2) the difficulty in disassociation between climate signals (rainfall pattern), the signal generated by land use and vegetation changes, affecting basin runoff.

This dissertation presents a new methodological approach based on (1) acquisition of long-term hydro-sedimentary records of geological evidences (geomorphological and sedimentary), documentary data (descriptions of extreme floods) and instrumental records (rain), and (2) analysis of the hydro-sedimentary response to climatic variations and changes in land use using a distributed hydrological model (TETIS-SED).

The study site is part of the Upper River Guadalentín. It is a Mediterranean ungauged basin with a strong torrential behavior. It is located in southwestern Iberian Peninsula, between the provinces of Murcia and Almería. Its extension is a little above 400 km², and it has a total drop of approximately 1300 m, limited in its lowest point by Valdeinfierno Dam. The study basin is characterized by short hydrological-sedimentary records, which along with its torrential behavior can be considered representative of a large number of Mediterranean and high mountain basins. The basin response has been analyzed considering different time and record scale resolution: (a) geological scale from the early Holocene to present considering a centennial resolution (Chapter 3); (b) historical scale considering an annual-decadal resolution (Chapter 6); (c) instrumental scale considering a daily resolution (Chapter 4); and (d) future projections based on climate change and land management scenarios considering monthly-annual resolution (Chapter 5). This long-term approach, considering different resolutions in the analysis, improves our understanding of the hydrological and sedimentological dynamics along the basin history, and the trends and limitations of future projections including uncertainties associated with climate and global change models. The good correspondence between the distributed model and the basin behavior implies that the methodology used in this thesis can be confidently applied to other basins with similar characteristics.

Multidisciplinary approach is necessary in studies of the hydro-sedimentary behavior of the basin at different time scales. Its biases and characteristics depend on the type of information used. For that reason, the methodology used throughout this thesis has been adapted in each interval to the extension of the period (from several millennia to a few decades) and the information and data available for each of those periods (geological, documentary and instrumental).

Production of sediment at millennial scale (Holocene) has been determined by applying retrodictive methods to infer hydro-sedimentary behavior of the basin from sedimentary and

geomorphological evidences in response to climate variability and human influence. In historical and instrumental scale, the study of sediment production rates have been gathered by the application of the inductive method, considering field observations and measurements to develop an hydrodynamic model that can be generalized to other Mediterranean rivers. Observations, together with documentary and instrumental data have been used as a source for the implementation of the distributed hydro-sedimentary model TETIS-SED. This model has allowed the resemblance and reconstruction of the hydrological extremes occurred on the basin, and therefore to quantify the major factors involved in its sediment production. Regarding future projections, the hydro-sedimentary behavior of the basin has been projected based on different global change scenarios. These scenarios have been divided into climate evolution scenarios and settings (configurations) of land use management. Climate projection scenarios has been acquired from the IPCC (2007b) models scaled using statistical downscaling based on local meteorological series. Nevertheless, the future land uses configurations were estimated considering demographic and socio-economic plausible situations, based on given current conditions and the political, demographic and economic trends. The multiple combinations of climate scenarios and land use configurations have been implemented in the TETIS-SED model which has simulated a range of possible future trends in hydrology, erosion and sediment production in the watershed.

The results of the different simulations of basin Valdeinfierno using TETIS-SED model have shown that this tool is a suitable approach to the characterization of the basin, showing good accuracy, slightly conservative since it tends to underestimate the results of events extreme hydrological and erosion. Improving the simulation results obtained at different spatial scales (basin and sub-basin), have been possible due to calibration and validation TETIS-SED model using sediment produced indirect evidence for events individual runoff accumulated in forest dams (check-dams) and sediment retention in the Valdeinfierno reservoir.

The correspondence of the hydrological model results with observational data indicates the reliability of the model. For that reason it is possible to apply the climate changes provided by the 4th IPCC report (AR4) to the model. These variations affect recurrence (decrease) and magnitude (increase) of the extraordinary events in the watershed, conditioning their water intake and its erosion effects during the XXI century. However, the application of the available information regarding hydrology during the nineteenth and twentieth centuries, compared with global models of climate reanalysis circulation, has revealed that the study area is strongly influenced by local atmospheric circulation conditions, but also responds to global climate changes. This strong dependence on local climate conditions, combined with the low frequency of extreme precipitation during the reference period used to calculate the meteorological conditions during the climate projection period (1961-1990), implies that the calculated results of climate projection should be considered with caution. That limitation does not affect the relationship between the scenarios of climate projection and the land uses configurations (only their absolute values). Therefore, the different projections suppose a useful tool in scenario selection oriented to minimize erosion processes in the studied watershed.

Different data (sedimentary, documentary and instrumental) in conjunction with the hydrologic and sediment transport model allows the characterization of Valdeinfierno as a hydrological extremes highly dependent watershed. During those extremes the highest erosion and sediment transport rates occur determined by the magnitude of the extreme phenomenon. Holocene alluvial records indicate that a similar behavior has been occurring in the basin for the last 3000 years. These records show that the alluvial aggradation is concentrated in certain time intervals lasting several decades, and those intervals are climatically coincident with cold periods and/or periods of climatic transition, which may be magnified by human occupation influence.

Management and land uses in Valdeinfierno basin has proved to be a decisive factor in the hydrological behavior of the basin, especially regarding erosion and sediment transport. It has been observed that while the hydrology of the basin is dependent on the percentage of each land use occupation, sediment transport and erosion are more dependent on the spatial distribution of land use, mainly referred to the local slope. The differences between hydrology and erosion behavior imply that the optimal soil use scenario for soil conservation, may differ from the optimal soil use scenario oriented to minimize the generated water volume during floods. The different land use configurations have shown that, in general, greater portions of land with dense natural vegetation, leads to greater soil conservation and a reduction of flood magnitude. However, an overabundance of natural vegetation restricts the human activities in the watershed. Therefore, it is concluded that the optimal land use configuration (more sustainable) should combine an advanced state of evolution of natural ecosystems on the slopes, along with farming techniques aimed at soil conservation in the more leveled areas, such as green fallow or multi-crop fields. From a practical point of view, it has been noted that the land use management is a major tool on global change mitigation in short and medium term, presenting faster and more efficient influence of soil uses implementation in erosion, than the effects of actions orientated to mitigate greenhouse gases emission effects on climate.

Agradecimientos

Esta Tesis Doctoral no habría sido posible sin la ayuda, colaboración, soporte logístico y/o moral y la implicación de un importante número de personas e instituciones. Por ello quisiera dedicar unas líneas a mostrarles mi gratitud.

En primer lugar me gustaría agradecer a mi director Gerardo Benito todo el esfuerzo invertido en esta tesis, tanto desde el punto de vista mental como físico, por estar abierto a nuevas ideas, facilitarme el acceso a instrumental y información gracias a sus múltiples contactos, y sobre todo por ayudarme a plantearme las preguntas correctas para desarrollar una mentalidad científica. A mi codirectora Yolanda Sánchez Moya y a su marido Alfonso Sopena, por su apoyo en todos los sentidos, aguantando estoicamente largos viajes a Almería, calor, barro, lluvia, y mucho sedimento en suspensión. Espero haber aprendido ni que sea un poco de vuestro buen hacer. A mis compañeros de grupo María José, Pablo, Alicia y Mikel por vuestra inestimable ayuda y opinión sincera sobre los temas que se incluyen en esta tesis, y por hacer que nuestro pequeño grupo sea en realidad una pequeña familia científica (bien avenida además). A todos los demás compañeros pre-post doctorales, técnicos, personal de apoyo, mantenimiento y administrativo del Museo Nacional de Ciencias Naturales/Instituto de Ciencias Agrarias/Centro de Ciencias Medioambientales, por dar humanidad y alegría al centro, compartir desayunos comidas y alguna cenita puntual, y en el fondo por vuestra amistad estando ahí para lo que sea. Un abrazo a todos!

A todos los miembros del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, y en especial al profesor Félix Francés, a Gianbattista Bussi y a Marta Pasquato, por vuestra asistencia e implicación en este trabajo con especial agradecimiento por vuestra disposición a resolver todas las dudas planteables (y alguna más) en todo lo referente a la modelización hidráulica, y acogerme como uno más (pachangas incluidas) en mis cortas estancias en la UPV. Al personal de la Estación Experimental de Zonas Áridas del CSIC y en especial a Albert Solé, Emilio Rodríguez, Ashraf Afana por vuestra ayuda y soporte logístico, en el campo y en la obtención de información los sedimentos y diques en la zona de estudio por la que también quiero agradecer la colaboración de y Cristina de Armas. Al personal del hotel Velad Al Abyadh de Vélez Blanco por hacerme sentir en casa en las campañas de campo. A la Agencia Española de Meteorología (AEMET), el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y a la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS) por facilitarme la información y los datos necesarios para el desarrollo de la Tesis Doctoral. A la Consejería de Medioambiente Junta de Andalucía, y en especial a Jaime De Lara Pasquín, por tu interés en el proyecto y por facilitarme el acceso a partes de los parques naturales cerradas al público general, así como por compartir tu información sobre las infraestructuras de la cuenca de Valdeinfierno.

A todos mis compañeros y amigos que he conocido en el *United States Geological Survey* de (USGS) de Portland (EU), en especial a Jim O'Connor, Terrence Conlon, Chauncey Anderson, Krista Jones, Jojo Mangano, Mackenzie Keith, Charlie Cannon y Andrew Kerslake. También a los que he conocido en el *Imperial College* de Londres (UK), en especial a Wouter Buytaert, Hara Spathi, Rob Wright, Quentin Cheok y Karl Smith.

A todos los que seguro que me he dejado en estos agradecimientos y tengo mucho que agradecerlos.

También me gustaría dedicar unas líneas para agradecer a un nivel más personal a mis padres, cosa que tan solo puedo hacer en mi lengua materna.

Us vull agrair tot el suport que m'heu donat al llarg dels anys i la fe que heu tingut en mi, donant-me suport en totes les etapes de la meua vida, fins i tot les que no heu vist gens clares, donant-me tots els medis per a poder estudiar i arribar on soc sense esperar res a canvi. Tinc que dir que més d'una vegada heu cregut més en mi que jo mateix, fent-me veure que els únics límits se'ls imposa un mateix. Us dec tot el que soc i tot el que mai seré. Espero fer-ho la meitat de bé quan un faci avis.

Las últimas líneas se las quiero dedicar a Jelena. Ambos sabemos que esta tesis ha sido posible gracias a ti y a tu sacrificio, es algo que nunca podré olvidar. Encontrarte ha sido la mayor fortuna de mi vida, tú me completas y me haces mejor persona. Espero pasar el resto de mis días a tu lado intentando compensar todo lo que haces y has hecho por mí. Volim te puno.

...Za Jelenu...

Índice

Resumen.....	5
Abstract	9
Agradecimientos	13
Índice	17
Capítulo 1: Introducción general y objetivos	21
1.1. Introducción.....	23
1.2. Hipótesis inicial del estudio y objetivos.	25
1.3. Fuentes de datos y metodología.....	26
1.4. Estructura de la tesis doctoral.....	28
Capítulo 2: Zona de estudio.....	31
Introducción.....	33
2.1. Contexto geográfico.....	33
2.2. Contexto geológico.....	34
2.3. Contexto geomorfológico.....	36
2.4. Contexto climático	37
2.5. Contexto hidrológico.....	37
2.6. Contexto edafológico.....	38
2.7. Usos del suelo	41
2.8. Presa de Valdeinfierno	44
Capítulo 3: Actividad aluvial y de producción de sedimentos durante el Holoceno: Aproximación a su significado paleoambiental a escala secular.....	47
Introducción.....	49
3.1. Contexto Regional y Antecedentes.....	51
3.1.1.Geología y Geomorfología de la zona de estudio.....	51
3.1.2.Paleogeografía y evolución del modelado durante el Pleistoceno.....	52
3.1.3.Antecedentes de la historia aluvial holocena de la Cuenca Baja del río Guadalentín.....	54
3.1.4.Ocupación Humana.....	55
3.1.5.Paleoclima Holoceno.....	57
3.2. Metodología para la determinación del comportamiento de la cuenca	58
3.3. Resultados	60
3.3.1.Sector de María (1).....	60
3.3.2.Sector del Cortijo de Guadalupe.....	68
3.4. Discusión sobre la cronología de los periodos de agradación e incisión Holocena	81
3.5. Conclusiones	87

Capítulo 4: Respuesta hidrológica a los cambios en el uso del suelo y eventos extremos en periodo instrumental	89
Introducción.....	91
4.1. Antecedentes en el estudio de la distribución espacial y temporal de la erosión y producción de sedimento en la cuenca del río Guadalentín	92
4.1.1. Tasas producción y transporte de sedimentos en el contexto regional	93
4.2. Implementación del modelo TETIS y el módulo TETIS-SED.....	95
4.2.1. Datos y parámetros hidrológicos.....	95
4.2.2. Datos meteorológicos	103
4.2.3. Parámetros de erosión del suelo	105
4.2.4. Estimación de la producción de sedimento	110
4.2.5. Calibraciones del modelo TETIS y el módulo TETIS-SED	126
4.2.6. Resultados y análisis de las simulaciones.....	134
4.2.7. Discusión de los resultados de las simulaciones	144
4.3. Influencia de la gestión del territorio en las tasas de erosión y producción de sedimento	145
4.3.1. Historia reciente de los cambios de uso del suelo y gestión del territorio.....	146
4.3.2. Variaciones de la hidrología en función de los cambios en los usos del suelo.....	153
4.3.3. Discusión sobre la influencia de la gestión del territorio en los procesos hidrológicos.....	159
4.4. Conclusiones	160
Capítulo 5: Hidrología y producción de sedimentos en respuesta a escenarios de cambio climático y de usos del suelo	163
Introducción.....	165
5.1. Influencia de las variables climáticas.....	167
5.1.1. Variables sinópticas determinantes para la reducción de escala	168
5.1.2. Series meteorológicas sintéticas	172
5.2. Escenarios climáticos y evolución hidrológica y sedimentológica de la cuenca de Valdeinfierno .	180
5.2.1. Escenarios de cambio climático.....	181
5.2.2. Variables meteorológicas.....	183
5.2.3. Modelización hidrológica y producción de sedimentos asociada a distintos escenarios de cambio climático	186
5.2.4. Determinación de la evolución de la hidrología y el transporte de sedimentos a lo largo del siglo XXI en función del clima.	199
5.3. Escenarios de evolución de los usos del suelo y su influencia en la respuesta hidrológica y sedimentaria	201
5.3.1. Configuraciones de usos del suelo	202
5.3.2. Evolución de la hidrología y el transporte de sedimentos en la cuenca de Valdeinfierno a lo largo del siglo XXI.....	213

5.3.3. Discusión sobre la evolución hidrológica y de transporte de sedimentos de la cuenca de Valdeinfierno a lo largo del siglo XXI	217
5.4. Conclusiones	219
Capítulo 6: Hidrología y producción de sedimentos en la cuenca de Valdeinfierno en los siglos XIX y XX	222
Introducción.....	224
6.1. Cambios de uso del suelo y gestión del territorio en los siglos XIX y XX.....	226
6.2. Meteorología en la cuenca de Valdeinfierno entre los siglos XIX y XX.....	229
6.2.1. Reconstrucción de la precipitación.....	230
6.2.2. Reconstrucción de la temperatura	239
6.3. Simulación de la Hidrología y el transporte de sedimentos en la cuenca de Valdeinfierno.....	242
6.3.1. Hidrología histórica y su producción de sedimentos en Valdeinfierno entre los siglos XIX y XX en el contexto de cambio climático y ambiental.....	249
6.4. Conclusiones	251
Capítulo 7: Síntesis, discusión y conclusiones.....	254
Introducción.....	256
7.1. Comportamiento hidrológico y sedimentario de la cuenca de estudio.....	257
7.2. Discusión integrada.	262
7.3. líneas a desarrollar.....	267
7.4. Principales aportaciones.....	268
7.5. Conclusiones generales.....	268
7.6. Conclusions.....	271
Synthesis.....	274
Bibliografía	280
Anexos	300
Índice de figuras	302
Índice de tablas.....	308
Glosario de términos.....	312
Glosario de unidades.....	318

Capítulo 1: Introducción general y objetivos

1.1. Introducción

Las avenidas extremadamente rápidas o *flash-floods*, consisten en eventos de inundación súbita de corta duración (de algunas horas a pocos días), generadas habitualmente en cuencas con elevadas pendientes y poca vegetación, durante fenómenos de intensa precipitación (Doswell et al., 1996). Durante estas lluvias intensivas se produce una elevada actividad de los procesos geodinámicos superficiales que implican la reactivación de la erosión en las laderas y de transporte sedimentario en los cauces fluviales. Esta aceleración los procesos de erosión y de transporte de sedimentos es particularmente importante en las cuencas mediterráneas donde la escasa vegetación y la elevada pendiente de las laderas genera importantes pulsos de sedimentos que se acumulan en los fondos de los valles y depresiones. Mientras que el impacto del clima en los patrones (magnitud y frecuencia) de las precipitaciones intensas y las inundaciones ha sido abordado en todos los informes anteriores del IPCC (1988-2007), su impacto sobre la producción de sedimentos solo se ha considerado recientemente (IPCC, 2014). El último informe de este organismo (IPCC, 2014) señala la necesidad de obtener registros largos sobre erosión y producción de sedimento en cuencas fluviales, y de separar la señal climática de la antrópica permitiendo concretar la atribución de los cambios registrados en las tasas de producción de sedimento. A nivel europeo, este tipo de eventos se concentran principalmente en zonas de alta montaña y zonas mediterráneas (Gaume et al., 2009).

Por tanto, resulta crucial avanzar en el estudio de los eventos extremos en el contexto del Cambio Global (Clima y cambios de usos del suelo), en particular en aquellas regiones como la mediterránea donde los extremos son una característica intrínseca del régimen hidrológico.

El estudio de los impactos de las inundaciones, entendidas como el transporte de agua y sedimento, resulta difícil de abordar, debido a la limitada disponibilidad temporal de registro de aforos y su escasa distribución espacial (Frei y Schär, 2001; Klein Tank y Konnen, 2003). Estos registros pueden ser ampliados con la información de cuencas no aforadas (Bussi et al., 2013) y pueden ser extendidos a varios cientos e incluso miles de años, a partir de evidencias sedimentarias y botánicas (Baker et al., 1983), o de evidencias documentales mediante descripciones de los eventos extremos sobre fechas y niveles alcanzados por las avenidas (e.g. Barriendos y Martin-Vide, 1998; Barriendos y Rodrigo, 2006; Brazdil et al., 2006).

En la última década se han realizado estudios de paleoavenidas e inundaciones históricas en diversas cuencas españolas y francesas (e.g. Sheffer et al., 2003; Benito et al., 2004a; Thorndycraft et al., 2005; Benito et al., 2010) mostrando que las avenidas extremas se producen con mayor frecuencia en determinados periodos del pasado, en concreto y para el Mediterráneo español, durante los intervalos 2865-2340, 2330-1870, 960-790, y 520-290 años antes del presente (B.P.). Estos periodos corresponden en general a momentos de variaciones rápidas del clima en Europa en los que se denotan cambios en las condiciones de circulación

atmosférica en nuestras latitudes. En el periodo histórico, la escorrentía se ha incrementado como consecuencia de la ocupación humana, debido a la deforestación y a los cambios usos del suelo en favor de la agricultura y la ganadería. En los distintos estudios de paleoavenidas se han encontrado indicadores claros de estos cambios, tanto en la textura de los sedimentos como el incremento de la magnitud de las avenidas, constatándose documentalmente que dichas avenidas ocurrieron en momentos de aumento de la población y de roturación masiva de tierras marginales.

La tasa de erosión es una de las variables de las que menos datos se dispone en los estudios hidrológicos y paleohidrológicos, las metodologías históricamente más utilizadas para su determinación se centran en datos y observaciones instrumentales a pequeña escala, que comprende la medida puntual de rebajamiento del suelo (e.g. agujas de erosión) o en volúmenes de sedimentos recogidos en laderas o cuencas experimentales (e.g. Francis, 1985; Poesen et al., 2002; Nadal-Romero et al., 2013). Las técnicas experimentales aplicadas a escala de ladera son muy útiles para entender las relaciones causa-efecto de la erosión del suelo en condiciones controladas, pero no son extrapolables en la estimación de la producción de sedimento que se produce en una cuenca. La determinación de la dinámica sedimentaria dentro de una cuenca hidrológica, es compleja y está limitada por la cantidad y calidad de los datos instrumentales disponibles (Beven, 1993; Blöschl y Sivapalan, 1995; Beven, 2001). Distintos autores han planteado como alternativa para el cálculo de la erosión y la producción de sedimento la determinación de los volúmenes sólidos retenidos en presas e infraestructuras hidráulicas menores como diques de retención (e.g. Avedaño, 1997; Verstraeten y Poesen, 2001; Boix-Fayos et al., 2008). Este planteamiento permite la toma de datos de producción de sedimento en cuencas no aforadas y sin instrumentación específica, aunque limita el análisis de la sedimentación a los volúmenes de sedimento totales, sin considerar el transporte generado por eventos individuales de precipitación-escorrentía.

Otro aspecto a tener en cuenta en el uso de diques de retención como indicador de la erosión en una cuenca es la representatividad de las tasas de erosión a nivel de sub-cuenca frente al volumen de sedimento movilizado a escala mayor o de conjunto de la cuenca. En este sentido, existe un factor de escala y de conectividad del sedimento a considerar y, en su caso, corregir en la tasa de producción de sedimento generado en cualquier punto de la cuenca de drenaje. De este modo, se debe considerar la conectividad del sistema fluvial y de los procesos que actúan, desde la pérdida por erosión en la ladera hasta la producción de sedimento registrada a la salida, en lo que Walling (1983) describió como *The sediment delivery problem*. Este problema de conectividad del sedimento se pone de manifiesto cuando se comparan las tasas de erosión obtenidas por diferentes métodos y escalas (puntual, ladera y cuenca) referidos a los mismos periodos de medida (Romero-Díaz et al., 2007). Los buenos resultados obtenidos en el estudio de los rellenos sedimentarios en diques (Bussi et al., 2013) y su consistencia con los a diferentes escalas espaciales muestra el potencial de las técnicas proxy para ampliar el periodo de registro de la producción de sedimento ligada a eventos extremos de escorrentía.

En esta tesis doctoral, se desarrolla el estudio hidrológico y producción de sedimento de una cuenca mediterránea no aforada con un marcado régimen torrencial, desde principios del Holoceno.

El comportamiento de la cuenca ha sido estudiado a distintas escalas y con distintas metodologías en función de cada uno de los periodos considerados. La evolución morfosedimentaria de la cuenca a lo largo de los últimos milenios ha sido determinada mediante el registro aluvial Holoceno. En el periodo actual del que se dispone de registro instrumental, el comportamiento de la cuenca ha sido analizado a nivel de evento utilizando un modelo hidrológico-sedimentario distribuido que incluye mediante capas de información (cartografía) las características físicas químicas, geográficas, edafológicas, geológicas y de gestión de los suelos de la cuenca, así como datos de estaciones meteorológicas como datos de origen. El modelo ha sido calibrado y validado a nivel general y de evento, con registros de volumen acumulado de agua y sedimentos en los distintos diques y embalses de la cuenca. Igualmente se ha estimado la respuesta hidrológica y de producción de sedimento acumulado en la cuenca considerando distintas proyecciones de cambio climático (Nakicenovic et al., 2000), y diversas configuraciones plausibles de usos del suelo. Por último, se ha abordado la relación entre los registros sedimentarios e históricos y las condiciones medioambientales de la cuenca estudiada utilizando la información regional e histórica disponible (censos de población y usos del suelo), con el objetivo de reconstruir los hidrogramas de avenidas a partir de datos de paleoavenidas y de avenidas históricas.

1.2. Hipótesis inicial del estudio y objetivos.

La hipótesis de partida de esta tesis doctoral es que la producción de sedimento en una cuenca mediterránea (cuenca del Guadalentín) presenta cambios significativos en el tiempo en respuesta a episodios con concentración de eventos extremos de escorrentía, relacionados con la variabilidad climática, y a los cambios en la vegetación y usos de suelo. La comprobación de esta hipótesis requiere de datos cuantitativos y cualitativos de la producción de sedimento, clima (lluvia, temperatura) y vegetación (tipos y uso), así como su estudio a diferentes escalas temporales que incluyen el pasado (datos proxy e históricos), presente (datos instrumentales) y futuro (escenarios y proyecciones). Por ello, nos planteamos un desarrollo metodológico no-convencional donde la información contenida en los registros sedimentarios aluviales, los registros históricos y la acumulación de sedimentos en presas (forestales e hidráulicas) se utilizan para complementar la información hidrológica y de transporte de sedimento instrumental, permitiendo concretar el comportamiento hidrosedimentario en intervalos temporales entre decenal-secular (cuantitativamente) y milenario (cualitativamente), y la elaboración de escenarios de proyección futura.

Esta tesis doctoral pretende alcanzar dos objetivos principales. El primero consiste en determinar el papel de los eventos extremos en la dinámica sedimentaria y de producción de sedimentos en una cuenca mediterránea, así como definir su sensibilidad a la variabilidad climática y a los cambios ambientales. El segundo consiste en poner a punto una metodología que combine la información instrumental, datos *proxy* (basados en evidencias hidro-sedimentaria) y de modelización de escenarios climáticos que permitan determinar la proyección de los procesos extremos en distintos escenarios de cambio climático y ambiental y evaluar su robustez y fiabilidad.

Estos objetivos generales, se desglosan en un conjunto de objetivos parciales orientados a abordar el estudio de estos cambios hidro-sedimentarios en distintas escalas temporales y de resolución que se detallan a continuación.

- I. Estudiar la evolución morfosedimentaria de la cuenca de estudio durante parte del Holoceno (últimos 7000 años), caracterizando las distintas fases de sedimentación e incisión observadas en el registro sedimentario, que permiten comprender el papel de la variabilidad climática y los eventos extremos en estos procesos.
- II. Implementar un modelo hidrológico distribuido con las condiciones actuales (periodo instrumental), mediante su calibración y validación con los escasos datos disponibles en una cuenca no aforada (volumen retenido en el embalse), permitiendo análisis del funcionamiento hidrológico y sedimentario de la cuenca a lo largo de todo el periodo instrumental, considerando la influencia sobre los procesos de las variaciones en los usos del suelo.
- III. Implementar este modelo hidrológico distribuido con los distintos escenarios de cambio climático mediante técnicas de *downscaling*, y determinar la respuesta hidro-sedimentaria para distintos escenarios de evolución de los usos del suelo.
- IV. Reconstrucción de la hidrología de la cuenca de estudio (periodo histórico), utilizando el modelo hidrológico en base a la información histórica, ambiental y regional disponible sobre variables climáticas y de configuración de los usos del suelo.

1.3. Fuentes de datos y metodología

El estudio del comportamiento hidro-sedimentario a diferentes escalas temporales implica una aproximación multidisciplinar al problema, cuyos sesgos y particularidades dependen del tipo de registro analizado. En este apartado se describe la metodología de forma genérica, ya que su explicación detallada se realizará en cada capítulo de acuerdo a sus contenidos específicos.

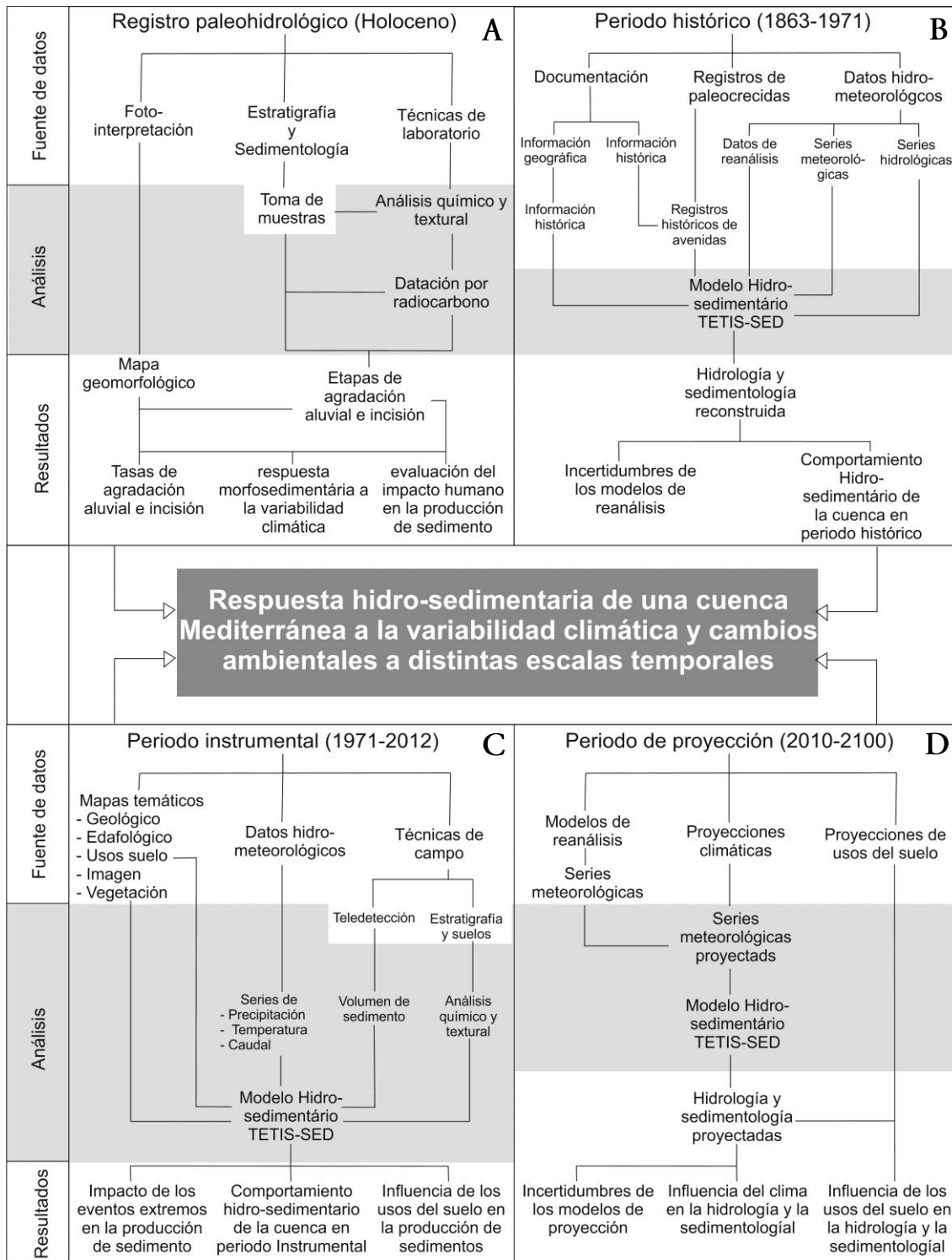


Figura 1.1: Diagrama de flujo de la metodología simplificada, empleada en los distintos periodos que componen la presente tesis doctoral. A: Registro paleohidrológico (Holoceno), B: Periodo histórico (1863-1971), C: Periodo instrumental (1971-2012), D: Periodo de proyección (2010-2100).

El estudio de la producción de sedimento a escala milenaria implica la aplicación de métodos retrodictivos que permiten inferir a partir de evidencias sedimentarias y geomorfológicas el comportamiento hidro-sedimentario en respuesta a la variabilidad climática y la intervención humana en el territorio (Figura 1.1A). Esta reconstrucción de los episodios de actividad erosiva ha requerido un trabajo de campo intensivo para comprobar las cartografías geomorfológicas

generadas a partir de la fotointerpretación, así como de la descripción estratigráfica y datación mediante radiocarbono que permiten determinar los episodios de producción de sedimento y las tasas asociadas a los mismos.

Por su parte, el estudio de las tasas de producción de sedimento a escala histórica e instrumental se basa en la aplicación del método inductivo donde a partir de observaciones y medidas de campo, se persigue la elaboración de un modelo de comportamiento hidro-dinámico generalizable a ríos mediterráneos. Los datos de partida u observaciones son de carácter documental para el periodo histórico (Figura 1.1B) e instrumental para el periodo actual (Figura 1.1C), que sirve de fuente de datos al modelo hidro-sedimentario distribuido (TETIS-SED) que permite modelar los eventos hidrológicos extremos y cuantificar los factores principales que intervienen en la producción de sedimentos.

El estudio del comportamiento hidro-sedimentario futuro se aborda a partir de escenarios. Un escenario es una descripción plausible de un futuro posible, pero en ningún caso es una predicción del mismo. El análisis de los escenarios incluye el desarrollo de escenarios, la comparación de los resultados de los diferentes escenarios, y la evaluación de sus consecuencias (Figura 1.1D). En nuestro caso, los escenarios de clima futuro se han obtenido de los modelos publicados por el IPCC (2007b) escalados de acuerdo al downscaling estadístico de las series meteorológicas locales. Por su parte, los escenarios de uso del suelo futuro se han confeccionado en base a situaciones demográficas y socio-económicas posibles, teniendo en cuenta que subsistencia de la explotación agrícola y ganadera se encuentran fuertemente condicionadas por las directrices fijadas por la Política Agraria Común (PAC).

En definitiva, los resultados obtenidos en cada capítulo han permitido la realización de una serie de consideraciones de carácter cuantitativo y cualitativo sobre la respuesta hidro-sedimentaria a los eventos extremos en una cuenca mediterránea característica del SE de España (Figura 1.1).

1.4. Estructura de la tesis doctoral

La presente tesis doctoral está organizada en siete capítulos. A continuación se expone brevemente el contenido de cada uno de ellos, siguiendo el presente capítulo introductorio (Capítulo 1).

Capítulo 2: El segundo capítulo se centra en el área de estudio, presentando sus características geográficas, geológicas, geomorfológicas, climáticas, hidrológicas y edafológicas, así como su historia, permitiendo la caracterización de la cuenca. Todos estos datos están orientados a la determinación de hidrológica y sedimentológica de la misma.

Capítulo 3: El tercer capítulo aborda la descripción paleohidrológica y paleoambiental de la cuenca de estudio. En él se determinan de las distintas dinámicas de erosión / acumulación

fluvial a lo largo del periodo Holoceno, asociadas principalmente a avenidas causadas por extremos hidrometeorológicos de precipitación. La relación de la dinámica hidrosedimentaria con la variabilidad climática del pasado permite entender mejor la respuesta y la sensibilidad de la cuenca a los cambios ambientales, y ofrece un marco de posibles efectos relacionados con futuras variaciones.

Capítulo 4: En cuarto capítulo se analiza el comportamiento de la cuenca durante el periodo instrumental, reconstruyendo la hidrología y el transporte de sedimentos mediante datos e información contemporánea de la cuenca. La implementación con datos instrumentales de un modelo hidrológico permite determinar la representatividad de este respecto a la cuenca de estudio, y posibilita plantear y discutir el efecto de los eventos extremos, así como el de las distintas variaciones ambientales que se produzcan en esta.

Capítulo 5: El quinto capítulo presenta distintas proyecciones del comportamiento hidrosedimentario de la cuenca de estudio en función de los distintos escenarios de cambio climático del IPCC (2007b). Sobre estos escenarios de clima se han superpuesto distintas configuraciones de cambios en los usos del suelo, basados en tendencias demográficas y naturales, y el efecto de distintas políticas sobre el uso y gestión del suelo. La combinación de escenarios climáticos y de usos del suelo permite diseñar las políticas y medidas más favorables para la conservación del suelo y la mitigación de los efectos de los grandes eventos de precipitación.

Capítulo 6: En el sexto capítulo se reconstruye la hidrología de los dos últimos siglos, considerando los modelos de reanálisis climático, los registros ambientales y regionales, y los registros de extremos reflejados en información documental. La reconstrucción de series hidrológicas más largas permite complementar a escala de detalle el efecto de las variaciones climáticas sobre los extremos y la hidrología.

Capítulo 7: El séptimo capítulo constituye en un capítulo de síntesis, donde se concatenan los resultados de los capítulos cuarto, quinto y sexto, con el fin de discutir las connotaciones de la simulación de la hidrología y el transporte de sedimentos en una cuenca, a escala diaria, durante aproximadamente dos siglos y medio. Este capítulo también incluye la discusión y las conclusiones generales de la tesis doctoral.

Capítulo 2: Zona de estudio

Introducción

La zona de estudio forma parte de la cuenca alta del río Guadalentín. Se trata de una cuenca de elevada pendiente, conocida por sus avenidas extremas (de hasta 3000 m³/s) que la caracterizan como una de las cuencas más torrenciales del Mediterráneo (Pardé, 1961). Tal es así que su nombre actual deriva del que le dieron los árabes *Oued al Lentin*, que significa río de fango y lodo. La torrencialidad del Guadalentín es debida a la climatología local, la escasa vegetación y las acusadas pendientes de su cuenca (Carrión Vilches et al., 2005). Estas características se pueden considerar representativas numerosos ríos efímeros de la región mediterráneas del SE Ibérico, y por tanto, las principales conclusiones de este estudio sobre las causas, procesos hidrológicos e impactos que se producen durante las avenidas extremas se pueden extender a la mayor parte de este tipo de cuencas.

2.1. Contexto geográfico

La cuenca de estudio (en adelante cuenca de Valdeinfierno) se encuentra en el Suroeste de España, situada en el límite entre la provincia de Almería (Comarca de los Vélez) y la Comunidad Autónoma de Murcia. Desde el punto de vista hidrográfico, forma parte de la cuenca hidrográfica del río Segura, en la parte alta del río Guadalentín, y su límite inferior se sitúa en la presa de Valdeinfierno, que da nombre a la cuenca (Figura 2.1).

La cuenca de estudio tiene una superficie de aproximadamente 429 km² con una cota máxima de 2045 m s.n.m en el Cerro Poyo y una cota mínima de 687 m s.n.m en el embalse de Valdeinfierno.



Figura 2.1: Situación Geográfica de la cuenca de estudio

Desde el punto de vista orográfico, los límites de la cuenca se dividen en cuatro flancos (Figura 2.2).

En el flanco S se sitúa el embalse y, por tanto, la salida de la cuenca. Este margen se prolonga desde la Sierra de María, donde se presenta la cota máxima de 2045 m s.n.m. (Cerro Poyo) en la cabecera del Río Caramel (o Alcaide), hasta el Collado de los Bollos (985 m.s.n.m). Esta

divisoria es muy abrupta y está definida por una sucesión de cerros, lomas y collados. En las proximidades de la presa destaca el Alto del Pericay (1236 m s.n.m.) que da nombre a la sierra en la que está emplazado.

El flanco E se extiende desde el Collado de los Bollos hasta el Alto del Carro (1264 m s.n.m.) que representa el extremo más septentrional de la cuenca. Otros elementos topográficos relevantes son la Sierra del Almírez y la Sierra de La Pinosa.

El flanco N se localiza entre el Alto del Carro y la Loma de la Cabaña (1247 m s.n.m.). Éste margen presenta una altura muy constante que oscila entre 1200 y 1300 m s.n.m. lo que se traduce en un relieve muy suave pese a la altura.

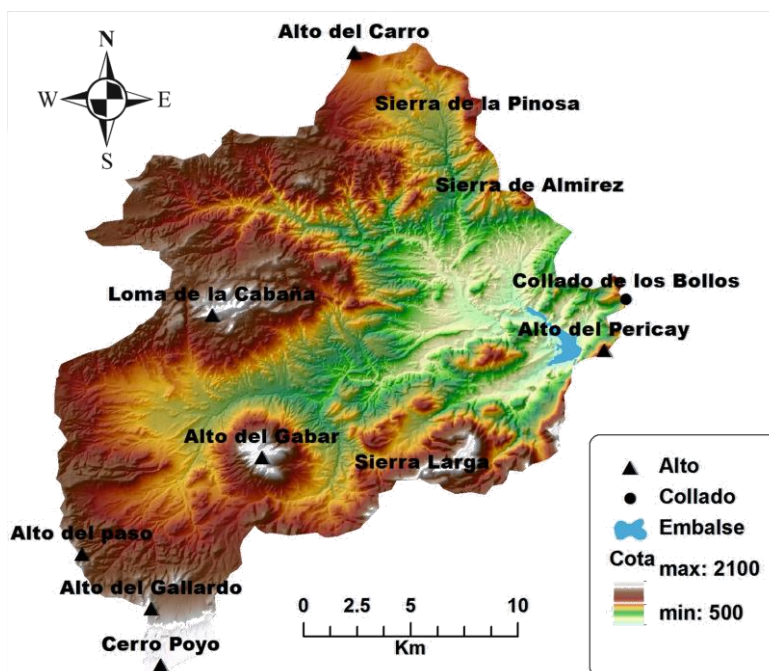


Figura 2.2: Mapa de elevaciones de la cuenca de Valdeinfierno dónde se identifica los elementos geográficos más significativos.

El flanco W de la cuenca se caracteriza por una topografía sin grandes desniveles, aunque destacan los Altos del Paso (1151 m s.n.m.) y del Gallardo (1263 m s.n.m.).

El relieve más accidentado del interior de la cuenca se reconoce en su mitad más meridional, donde cabe destacar el Pico del Gabar, (1510 m s.n.m.).

2.2. Contexto geológico

La cuenca del embalse de Valdeinfierno se sitúa en el conjunto de las Cordilleras Béticas y, dentro de ellas, en el Dominio Subbético, perteneciendo al Subbético medio e interno. Los materiales que componen este dominio son principalmente carbonatos y la mayoría de ellos se depositaron durante el Mesozoico. Los sedimentos originales han sufrido tres fases de deformación durante la Orogenia Alpina que han originado pliegues, cabalgamientos, deslizamientos, etc. Igualmente, afloran un conjunto de sedimentos denominados "post-manto", que son de composición detrítica y carbonática y se generaron durante el Neógeno. Estos sedimentos descansan discordantes sobre los anteriores. Desde el punto de vista litológico

y en relación a su comportamiento hidrológico se diferencian los siguientes conjuntos de materiales CEDEX (1995b):

Arcillas con yesos: Esta unidad aflora en el Norte de la cuenca. Se compone de arcillas abigarradas, areniscas en capas delgadas, dolomías, yesos multicolores y carniolas en facies *Keuper*, depositados durante el Triásico. Las arcillas son de color rojizo, violeta-azulado o verdoso. Las areniscas son de grano fino y muestran color verdoso o azulado. Las dolomías se presentan en general en bancos poco potentes. Junto con los yesos y en cantidad muy abundante, aparecen rocas volcánicas (ofitas), y que, en general, corresponden a diabasas o doleritas. Los materiales dominantes son las arcillas, que por ser fácilmente erosionables suministran numerosos aportes sedimentarios al embalse.

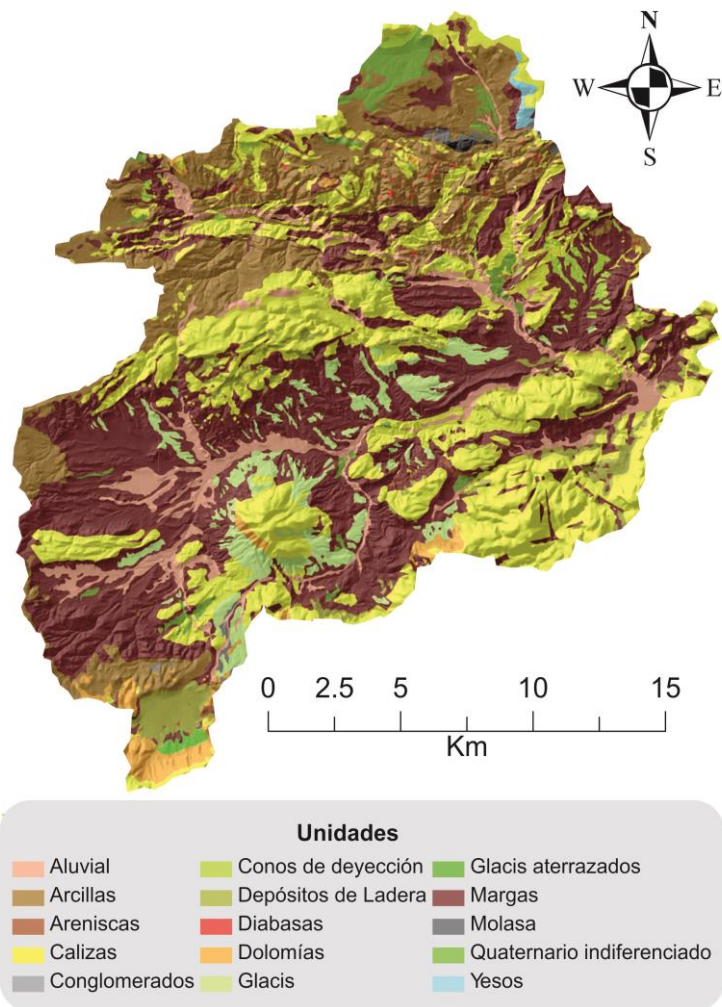


Figura 2.3: Unidades de comportamiento hidrológico similar determinadas mediante la combinación de los conjuntos litológicos del CEDEX y la simplificación de los mapas geológicos serie MAGNA del IGME, presentes en la cuenca de Valdeinfierno.

Materiales detríticos: Afloran fundamentalmente en los bordes occidental y septentrional de la cuenca. Se componen de conglomerados, areniscas y arcillas. Los conglomerados, que son bastante heterométricos, con cantos redondeados y de composición caliza. Esta unidad se atribuye al Plioceno. Estos materiales al erosionarse generan sedimentos silíceos y calizos de granulometría variable que pueden alcanzar el embalse.

Unidad de Carbonatos: Una amplia superficie de la cuenca está formada por materiales carbonatados que pueden ser calizas, dolomías o margas. La mayor parte de estas rocas pertenecen al Mesozoico pero también se encuentran carbonatos del Terciario. Los carbonatos al erosionarse generan fragmentos de roca, arcillas y carbonatos en disolución. Por su extensión

y proximidad, los carbonatos actúan como principal fuente suministradora de sedimentos al embalse.

Materiales cuaternarios: Bajo esta denominación se agrupan los depósitos aluviales cuaternarios que ocupan las ramblas y lechos de los ríos. Están constituidos por bloques, cantos, gravas, arenas, limos y arcillas, componentes todos que pueden alcanzar el embalse.

La caracterización litológica que se incluye en el modelo morfo-sedimentario en capítulos posteriores se basa en la clasificación de las unidades del CEDEX, aunque las categorías han sido desglosadas en unidades litológicas menores con un comportamiento hidrológico similar, combinando dicha clasificación con una generalización de la cartografía geológica del Instituto Geológico y Minero de España (IGME; Baena Pérez, 1972; Baena Perez et al., 1976; Baena Perez et al., 1978; Guzman del pino y Baena Perez, 1978) (Figura 2.3).

2.3. Contexto geomorfológico

La Comarca de Los Vélez, donde se sitúa la cuenca de Valdeinfierno, constituye un área de grandes contrastes, donde alternan las zonas de topografía suave con otras montañosas de abruptas pendientes (Lentisco Puche, 1995).

Los relieves más acusados corresponden a los afloramientos calcáreos que forman alineaciones montañosas de dirección general NE-SW, coincidente con las directrices estructurales de la zona. Los materiales más blandos (margas, limos, arcillas) aparecen más afectados por los agentes erosivos que los materiales carbonatados dando lugar a suaves formas alomadas. Estas formas han sido rellenas, en gran parte, por los depósitos cuaternarios más recientes que forman superficies de glaciares en las zonas meridional y septentrional de la comarca. Estos glaciares aluviales están afectados, en general, por importantes procesos de abarrancamiento como consecuencia de las intensas precipitaciones que ocurren en la zona y de los cambios de base de los cursos fluviales (Gea Pérez, 1986).

En la cuenca destacan los relieves sobre los que se asienta el Parque Natural de María-Los Vélez, y que forman parte de una gran estructura de dirección E-W (Orce - María - Mahimón), cuyo techo alcanza la cota de 2045 m. (Cerro Poyo), y que en su parte oriental presenta una inflexión hacia el N (sierras de Gabar-Pericay-Gigante). El relieve parece emerger bruscamente de las altiplanicies adyacentes, con las que contrasta fuertemente, tanto desde el punto de vista topográfico como paisajístico (Andreo Navarro, 1990).

Los relieves de la cuenca de estudio presentan, en su mayor parte, una marcada diferencia en la cubierta vegetal, con solanas generalmente desnudas y umbrías cubiertas por una frondosa masa boscosa. El piedemonte de las sierras ha desarrollado durante el cuaternario un sistema de glaciares y abanicos aluviales escalonados y que constituyen extensos de suave pendiente, ocupadas por

cultivos de cereal, así como carrascales, espinares, retamales, y tomillar ralo. Estas unidades conjuntamente con los materiales margosos que se intercalan con las unidades carbonatadas, son zonas deprimidas en las que la red fluvial encuentra las condiciones idóneas para un rápido encajamiento (Gea Pérez, 1988).

La red de drenaje en esta zona es mixta ya que coexisten cauces que adoptan una distribución dendrítica con otros que muestran una disposición radial o centrífuga. Esta última se caracteriza por una red circular con cauces paralelos procedentes de un cerro elevado y aislado, cuyo ejemplo más notable se localiza el Cerro Gabar. Alrededor de la base del cerro circula el río Caramel que actúa como colector principal (CEDEX, 1995b).

2.4. Contexto climático

La zona de estudio muestra características climáticas propias de un clima mediterráneo y de montaña. Su temperatura media anual se encuentra entre los 13 y 13.5°C, con temperaturas que en invierno bajan de los 0°C y que en verano pueden llegar fácilmente por encima de 30°C (CEDEX, 1995b), siendo el mes más frío enero y el mes más cálido julio. La precipitación media anual en la cuenca se encuentra alrededor de los 400 mm.

La combinación de las características de la temperatura y la precipitación, indican que la cuenca de Valdeinfierno responde a un clima semiárido Mediterráneo térmicamente continental, con una cierta influencia atlántica condicionada por el régimen pluviométrico, escaso y concentrado en los meses de otoño y primavera, tras una prolongada sequía estival.

La escasez de lluvias se ve agravada por su carácter estacional y por su elevada torrencialidad (hasta ~150 mm en 24 horas en el registro instrumental), lo que favorece el dominio de la escorrentía sobre la infiltración, contribuyendo a la intensificación del proceso de erosión. A todo lo anterior hay que añadir el riesgo de heladas en primavera, otoño e invierno, que pueden tener un efecto negativo sobre la agricultura, sobre todo las de primavera (Lentisco Puche, 1985).

2.5. Contexto hidrológico

La mayor parte de las tierras de la Comarca de los Vélez drenan sus aguas hacia el Mediterráneo, conformando la cuenca alta del Guadalentín y alimentando los embalses de Valdeinfierno y de Puentes en la provincia de Murcia. La red de drenaje superficial está formada en su mayoría por cursos con caudal discontinuo que permanecen secos durante la mayor parte del año. Los más importantes son: la Rambla de Chirivel en el tercio meridional de

la Comarca y el Río Caramel en el tercio septentrional. Ambos cursos fluviales están alimentados por cauces caracterizados por un alto encajamiento, perfiles de alta pendiente y caudales estacionales.

El río Alcaide, también conocido en su primer tramo como Caramel, tiene su cabecera en la umbría de la Sierra de María. Aguas abajo recibe en su margen derecha la práctica totalidad de las aguas de la vertiente norte de la sierra María. En su margen izquierda desembocan las aguas de la parte norte de la cuenca, transportadas por los arroyos de Santonge, Moral y, especialmente, por la Rambla Mayor. El río Alcaide está considerado como el curso de agua más continuo y regular a lo largo del año en toda la comarca de los Vélez (Moreno Cayuela, 1983).

La ausencia de una aportación importante de agua superficial (excepción hecha de las corrientes esporádicas de tipo torrencial), conlleva que las necesidades hídricas de la zona (consumo urbano, regadíos, etc.) dependa de las aguas subterráneas que afloran a través de diversos manantiales o extraídas mediante sondeos, pozos o galerías. Desde el punto de vista hidrogeológico, la zona de estudio se ubica sobre los dos grandes sistemas acuíferos correspondientes a la sierra de María y de las sierras de Pericay-Gigante-Gabar respectivamente. Ambos acuíferos corresponden a sistemas kársticos constituidos por las calizas y dolomías del Jurásico Penibético y cuya base es impermeable por la presencia de los materiales margosos del Subbético de la Zona Intermedia (González Ramón, 1991).

Los recursos potenciales del sistema acuífero de Sierra de María están comprendidos entre 17.6 y 19.8 Hm³/año, de los que 7.5 a 10 Hm³/año corresponden al sector oriental, localizado en el ámbito del Parque Natural que se explotan mediante sondeos o, por las surgencias naturales (28), de las cuales 4 drenan del orden del 80% del total de recursos. Los excedentes del agua de las surgencias no explotadas para el uso antrópico alimentan los embalses de Valdeinfierno y Puentes (Villalobos Megía et al., 1988).

2.6. Contexto edafológico

La información edafológica empleada en este trabajo corresponde a la suministrada por los mapas del proyecto de Lucha Contra la Desertificación del Mediterráneo (LUCDEME) 1:100000 del Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (Pujalte et al., 1990; Universidad_de_Murcia, 1990b, a; Pujalte et al., 1993). En estos mapas se identifican los distintos tipos de suelos utilizando el criterio de combinar un suelo mayoritario dominante y un suelo de inclusión (Figura 2.4). La zona de estudio se encuentra en la intersección de cuatro mapas sobre los que se ha identificado un total de 53 combinaciones de suelo mayoritario con suelos minoritarios o de inclusión (Figura 2.4, Tabla 2.1.)

Nº ID suelo	Suelo Dominante	Suelo Inclusión
33	Leptosoles líticos; Regosoles calcáricos	Cambisoles calcáricos
50	Cambisoles calcáricos; Regosoles calcáricos	Luvisoles cálcicos
40	Regosoles calcáricos; Calcisoles arídicos	
35	Regosoles calcáricos	
39a	Cambisoles calcáricos; Regosoles calcáricos	Luvisoles cálcicos
11pla.,11b lad.	Cambisoles calcáricos; Regosoles calcáricos	
22	Fluvisoles calcáricos	
20	Regosoles calcáricos	Regosoles lépticos
45	Regosoles calcáricos; Calcisoles arídicos	Regosoles lépticos
38	Regosoles calcáricos	Leptosoles líticos; Regosoles lépticos
26	Leptosoles líticos	
9a,9b	Cambisoles calcáricos	Leptosoles réndzicos
14a	Cambisoles calcáricos; Leptosoles líticos	Leptosoles réndzicos
49	Regosoles calcáricos; Regosoles lépticos	Cambisoles calcáricos
32	Leptosoles líticos; Regosoles calcáricos	
34	Leptosoles líticos; Regosoles lépticos	Leptosoles réndzicos
51	Regosoles calcáricos	
41	Regosoles calcáricos; Calcisoles arídicos	Fluvisoles calcáricos
23	Fluvisoles esqueleti-arénicos	
0	Calcisoles arídicos	
4	Calcisoles epipétricos	
6	Calcisoles epipétricos	Leptosoles mólico
25	Gipsisoles hipergípsicos	Calcisoles arídicos
1	Calcisoles arídicos	Fluvisoles calcáricos
3	Calcisoles arídicos	Regosoles calcáricos
2	Calcisoles arídicos	Fluvisoles calcáricos; Regosoles calcáricos
5	Calcisoles epipétricos	Calcisoles arídicos
15	Cambisoles calcáricos; Leptosoles líticos	Regosoles calcáricos
42	Regosoles calcáricos; Calcisoles arídicos	Fluvisoles calcáricos; Gipsisoles hipergípsicos
47	Regosoles calcáricos; Gipsisoles hipergípsicos	Fluvisoles calcáricos
28	Leptosoles líticos	Cambisoles calcáricos; Leptosoles réndzicos
13	Cambisoles calcáricos; Fluvisoles calcáricos	
12	Cambisoles calcáricos; Calcisoles endopétricos	Fluvisoles calcáricos
8	Cambisoles calcáricos	Leptosoles líticos
7	Cambisoles calcáricos	
19	Cambisoles calcáricos; Regosoles calcáricos	Fluvisoles calcáricos; Leptosoles réndzicos
16	Cambisoles calcáricos; Leptosoles líticos	Regosoles calcáricos; Leptosoles réndzicos
10	Cambisoles calcáricos; Leptosoles réndzicos	Regosoles calcáricos
29	Leptosoles líticos	Leptosoles mólico; Calcisoles arídicos
44	Regosoles calcáricos; Calcisoles arídicos	Leptosoles líticos; Regosoles lépticos
46	Regosoles calcáricos; Gipsisoles hipergípsicos	
31	Leptosoles líticos; Calcisoles arídicos	Regosoles calcáricos
27	Leptosoles líticos; Calcisoles arídicos	
37	Regosoles calcáricos	Fluvisoles calcáricos; Calcisoles arídicos
24	Gipsisoles hipergípsicos	
36	Regosoles calcáricos	Fluvisoles calcáricos
43	Regosoles calcáricos; Calcisoles arídicos	Leptosoles líticos
49b	Regosoles calcáricos; Regosoles lépticos	Cambisoles calcáricos
17	Leptosoles líticos; Regosoles calcáricos	Cambisoles calcáricos
18	Cambisoles calcáricos; Regosoles calcáricos	
30	Cambisoles calcáricos	

Tabla 2.1: Suelos dominantes que pueden incluir suelos minoritarios (inclusiones) en los que se ha tomado muestra y se ha descrito su estructura y ambiente (pendiente, orientación y aspecto).

Cada combinación de suelos ha sido localizada en el campo (Figura 2.4), se ha realizado una descripción del paisaje de su contexto (Figura 2.5 A), se han excavado zanjas para su descripción de horizontes, textura, espesor y contenido en Materia Orgánica (M.O.) (Figura 2.5 B), y se han tomado muestras para su análisis físicoquímico (Figura 2.5 C, D). Los resultados de dichos análisis se presentan en el capítulo 4: Respuesta hidrológica a los cambios en uso del suelo y eventos extremos en periodo instrumental.

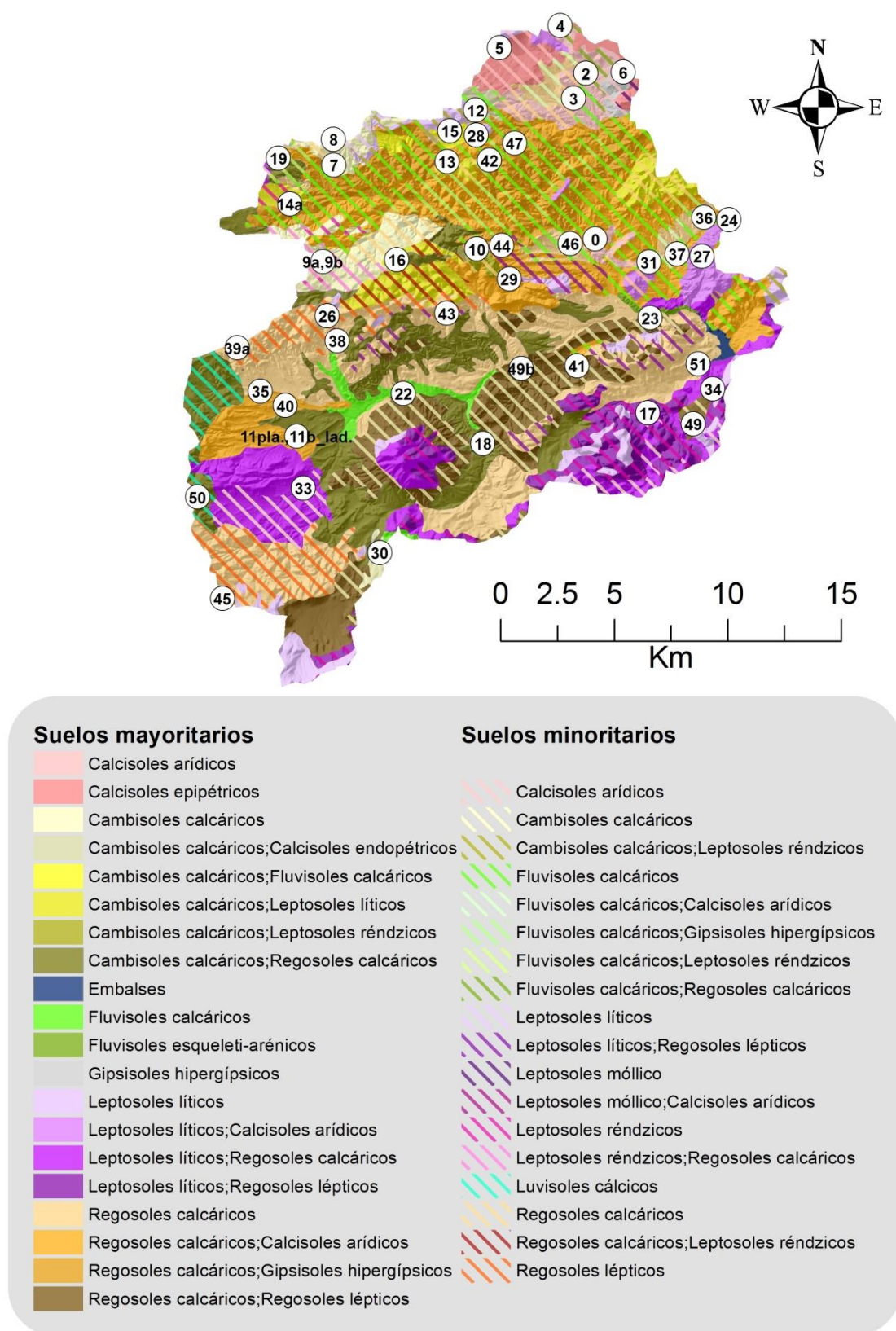


Figura 2.4: Tipología de los suelos presentes en la cuenca de Valdeinfierno. Los números indican puntos en los que se ha tomado muestras para el análisis fisicoquímico y se ha elaborado una descripción edafológica.

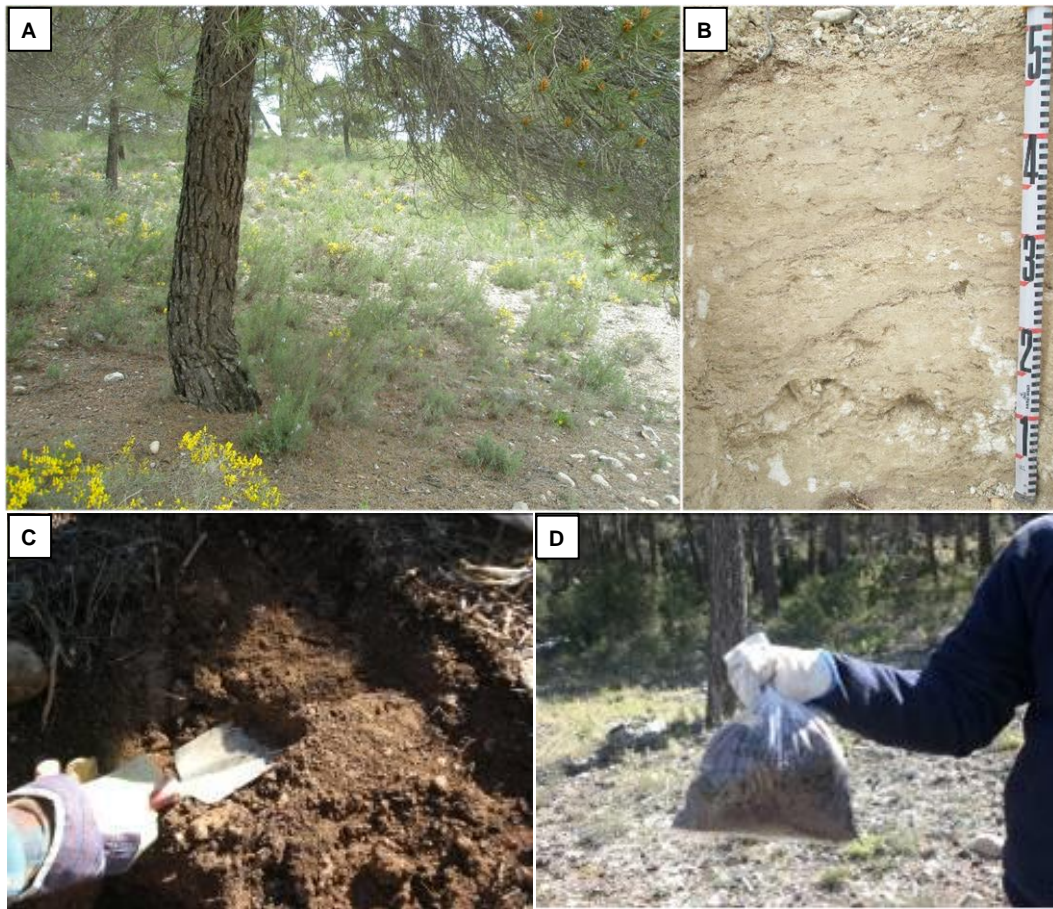


Figura 2.5: Ejemplo del procedimiento de campo para la toma de datos y muestras efectuada para cada uno de los tipos de suelo. Inicialmente se ha descrito el ambiente local del tipo de suelo (A), pendiente media y vegetación. Posteriormente se cava una cata en la que se describe la capa superficial de los suelos (B). Se retira la parte superficial de la zanja para evitar la sobrevaloración de materia orgánica (C). Por último se toma una muestra del suelo para su análisis fisicoquímico (D).

La caracterización de los suelos en campo y su cartografía se ha orientado al estudio de las propiedades hidrológicas, por lo que la descripción edáfica en detalle está fuera de los objetivos de esta tesis. La descripción edáfica detallada de cada tipo de suelo se puede encontrar en las memorias de las hojas 930 (Universidad_de_Murcia, 1990a), 931 (Universidad_de_Murcia, 1990b), 951 (Pujalte et al., 1990) y 952 (Pujalte et al., 1993) de los mapas 1:100000 de suelos del proyecto LUCDEME.

2.7. Usos del suelo

Los usos del suelo en la cuenca de estudio están ligados a la historia de la ocupación humana en la cuenca, que se remonta a la prehistoria. La relación hombre/medio físico ha cambiado a lo largo de la historia en función del desarrollo socio-económico y tecnológico de las sociedades.

Así, las sociedades prehistóricas poseen un nivel de alteración medioambiental muy bajo. La organización social, el nivel tecnológico y la organización del espacio de las sociedades "primitivas" permitieron un cierto equilibrio con el entorno natural, ya que sabían que la sobreexplotación de los recursos implicaba el agotamiento y el abandono de los terrenos cercanos. A falta de nuevos hallazgos y testimonios más precisos, durante el período prehistórico y clásico no se puede hablar en ningún caso de una población muy importante en la cuenca de estudio, aun disponiendo de una significativa concentración de yacimientos dispersos por toda la geografía comarcal, que indican la existencia de asentamientos permanentes desde el Paleolítico. Estas comunidades, que aprovechaban los recursos naturales para asegurar la subsistencia e intercambio de los excedentes, circunscribían su espacio vital (vivienda y trabajo) a lugares reducidos y localizados (Martínez García, 1994; Sánchez et al., 2002). En el capítulo 3 se describen en detalle los asentamientos prehistóricos e históricos más importantes y su evolución en el tiempo.

A lo largo de la época morisca, la comarca de los Vélez se enmarca durante dos siglos y medio, en el límite entre el Reino Nazarí de Granada (1246-1492) y el reino de Murcia. En esta zona de frontera se ha fomentado la construcción de torres y fortalezas de carácter militar, situadas en lugares de difícil acceso, controlando las rutas habituales del tráfico de personas y animales. Estas circunstancias, sin embargo, no favorecieron el asentamiento estable y significativo de comunidades rurales dedicadas al cultivo de la tierra o poblados urbanos de cierta entidad. Por lo tanto, las tierras y montes veleznos se encontraban cubiertos a lo largo de esta época por un extenso bosque, con la única excepción de alguna torre de vigilancia o las escasas "chozas" que servían de cobijo a pastores o agricultores.

En consecuencia, esta época se puede considerar como un período de escasa ocupación del espacio rural con baja presión ambiental sobre las áreas naturales de vegetación y fauna, a excepción de las actividades depredadoras de subsistencia desarrolladas por la escasa población veleznos-granadina y una incipiente actividad ganadera (Roth, 2008).

Con la repoblación de colonias cristianas (s. XV-XVI), la introducción de grandes rebaños y la mayor explotación de los montes, se originaron de manera inmediata conflictos entre pueblos, induciendo a divisiones jurisdiccionales y aparición de dehesas y zonas reservadas.

Se puede considerar que, en el último tercio del siglo XVI (1570-1600 se produce en los Vélez el cambio más radical de su historia. Se consuma la expulsión de los moriscos, y la propiedad pasa a manos de propietarios cristianos o a titularidad pública. Del mismo modo, también los montes veleznos, al convertirse en una fuente importante de recursos (pastos, caza, maderas, etc.) muy apetecidos por los conquistadores, se resintieron de la ordenación municipal y/o señorial castellana, originando varios conflictos entre María y Vélez Blanco, pero especialmente entre éste y Vélez Rubio, en el marco de una situación crónica de enfrentamientos entre ambas (García Latorre, 1998).

El Marquesado de los Vélez, creado oficialmente en 1507, uno de los más extensos del Reino de Granada, se mantuvo inalterable hasta la abolición del régimen feudal por los liberales en el siglo XIX (1835). El control y las prohibiciones del uso público del monte, junto con la potestad del aprovechamiento de los bosques y las duras penas que aplicadas a los causantes de incendios, todo ello orientado a la conservación de los bosques para el mantenimiento de la caza de la casa Marquesal, provocan que la explotación maderera y agrícola de los montes Velezanos sea menor que en otras áreas del país (Guerrero-Arjona, 2007).

La progresiva implantación del Nuevo Régimen o Estado Liberal en la primera mitad del siglo XIX y su consolidación posterior, afectaría decisivamente a los montes veleznos, en cuanto a su régimen de propiedad y aprovechamiento. El abuso de los vecinos y los ayuntamientos, talando arbolados, roturando masivamente y explotando ganaderamente los montes, da pie al planteamiento, por parte de la administración, de separación (refundición) del dominio de la comarca de los Vélez (de Olazábal, 1898).

Tras casi 20 años de trámites y arduas negociaciones, se firman los acuerdos del proceso de refundición, que se aprueban en 1899 y se sancionan definitivamente un año después. En consecuencia se inventaría y evalúa el monte velezano. La nueva legislación fija que se designen lugares apropiados para el pastoreo y dehesas, que comience la repoblación de forma inmediata, entre otras cuestiones, para evitar que el embalse de Valdeinfierno se colmate de sedimento, y que el estado adquiera las propiedades de la casa marquesal, como efectivamente ocurrió unos años después, aunque la Dehesa se vendiera a particulares (Araque Jiménez, 2009).

A lo largo de todo el siglo XX, con más o menos insistencia, se han llevado a cabo diferentes programas de repoblación forestal, a iniciativa de la administración central, estableciendo convenios con particulares, con el concurso de los municipios y la dirección técnica de los ingenieros. Actuaciones que, en conjunto, se han recuperado espacios naturales en los montes Veleznos, aún con las matizaciones respecto de la masiva y casi única introducción de pinares y el olvido de otras especies vegetales arbóreas o arbustivas (Lentisco Puche, 1995). La implementación de la mayor parte de estos programas respondía a razones obvias: contener la importante erosión y frenar el enorme arrastre de materiales que inutilizaba los embalses (Valdeinfierno y Puentes), de donde se surte una parte importante de las huertas de Lorca (Montiel Pinilla, 1955). De este modo, los espacios más beneficiados coinciden con los montes públicos estatales o municipales y las cuencas que envían sus aguas al Luchena y el Guadalentín; en especial, la Rambla Mayor y el Caramel con sus múltiples afluentes.

Con los profundos cambios económicos, sociales y demográficos experimentados en las últimas décadas, el aprovechamiento de los recursos tradicionales del monte, antes tan necesarios y disputados, han ido perdiendo importancia hasta convertirse en residuales, a excepción de los pastos y la explotación maderera. Por el contrario, la caza se ha expandido en los montes de Vélez. Desde principios de siglo XX, el estado central ha ido adquiriendo, gestionando y repoblando las propiedades de la casa marquesal y de otros particulares, especialmente en el término de Vélez Blanco. Los Ayuntamientos, poseedores mayoritarios de los montes,

principales (latifundistas) de la provincia de Almería y unos de los más destacados de Andalucía, se limitan a subastar los pinos talados por prescripción técnica y repartirse los escasísimos y aleatorios beneficios de su venta o arrendamiento. La declaración como Parque Natural de una gran parte de los montes (aunque no todos) y el fomento progresivo del turismo de interior, les otorga una nueva dimensión económica y social y un renovado interés municipal, frente a su necesaria conservación y mejora (Martínez Artero, 2001).

Los estudios más recientes sobre el futuro económico-social de la Comarca de los Vélez, coinciden en señalar que, junto con la transformación agrícola-ganadera y la subsiguiente elaboración de sus derivados, los recursos naturales del parque y los propios municipios colindantes suponen la mejor y casi única posibilidad de desarrollo en la zona (Lentisco Puche, 1996)

2.8. Presa de Valdeinfierno

De entre todas las infraestructuras hidrológicas e hidráulicas presentes en la cuenca de estudio, destaca la presa de Valdeinfierno, que representa su punto más bajo. Los antecedentes históricos de dicha presa se remontan a 1550, cuando el regadío de Lorca solicitó de los poderes públicos la traída de aguas de los ríos Castril y Guardal, de la cuenca del Guadalquivir, redactándose los correspondientes proyectos en el año 1576, durante el reinado de Felipe II. Las obras de transvase no se iniciaron hasta el reinado de Carlos III, interrumpiéndose poco después por problemas económicos y sociales. Ante tales circunstancias, el rey desistió del citado trasvase y, en compensación por ello, por decreto de 11 de febrero de 1785, dispuso la construcción de las presas de Puentes y Valdeinfierno, la primera sobre el río Guadalentín y la segunda sobre su afluente el Luchena.

La presa de Valdeinfierno se ejecutó de acuerdo con el citado decreto, dando comienzo en marzo de 1785. Se construyó lentamente, cerrando sus compuertas el 15 de agosto de 1788 y abandonándose en 1806 sin haber sido totalmente concluida. La capacidad de diseño del embalse fue de 20 Hm³, aunque su altura construida fue menor, y en el momento de su abandono ya se encontraba parcialmente colmatada. Un error en el diseño provocó la imposibilidad de maniobrar las compuertas del desagüe de fondo de la presa, quedando progresiva y totalmente colmatada alrededor de 1850, como consecuencia de una gran avenida (Calvo García-Tornel, 1969) El embalse permaneció prácticamente abandonado y hasta el año 1874 no se pudo abrir el desagüe de fondo, lo que motivó que las aguas abriesen, a través de los sedimentos, un profundo cauce de erosión, con arrastre de unos 13.500 metros cúbicos de acarreo en 12 años, hasta 1886.

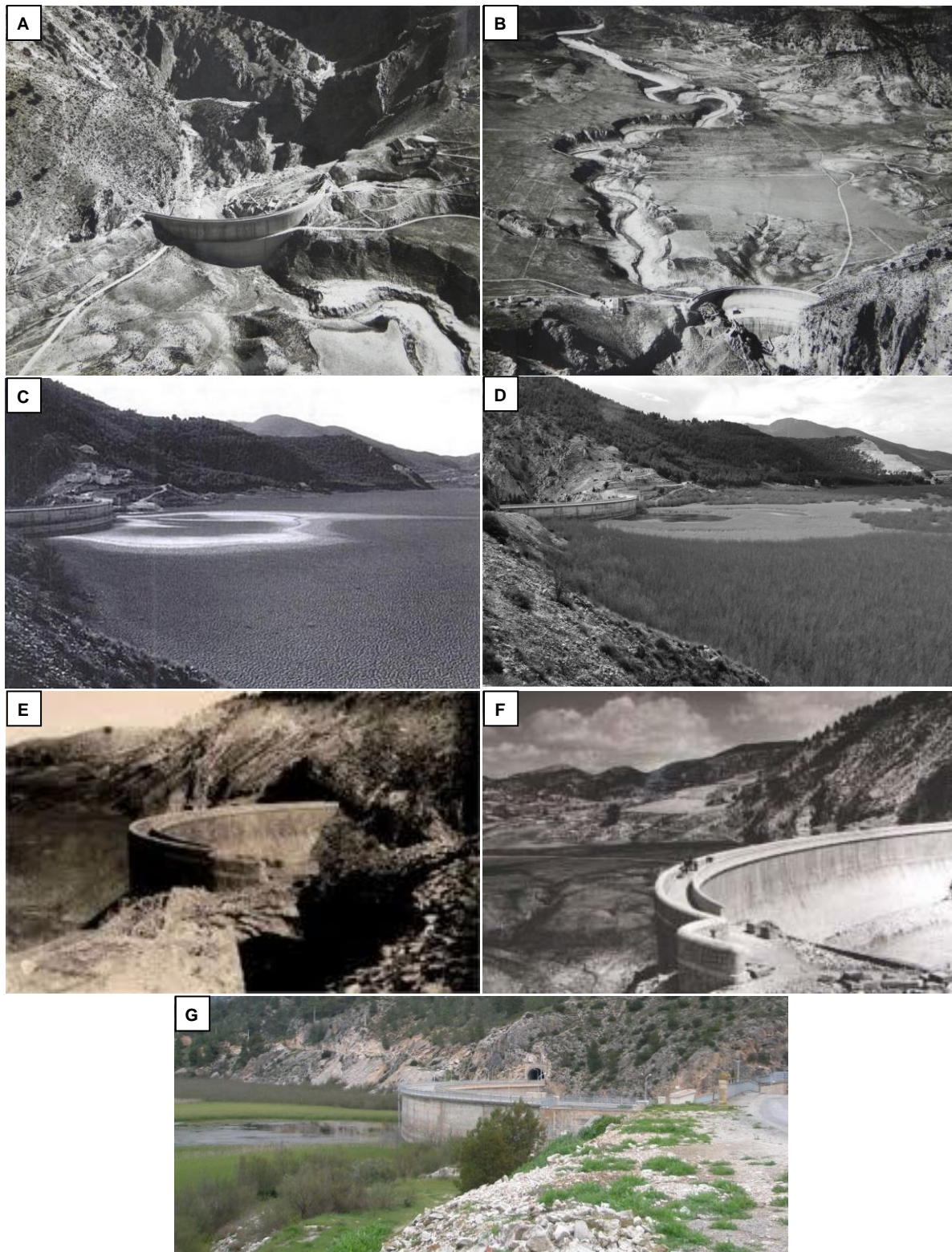


Figura 2.6: Imágenes de distintas épocas de la presa de Valdeinfierno. A) Paramento de la presa aguas arriba extraída de (Pelegrín Garrido, 2009). Se desconoce la fecha exacta de la toma. B) Antigua fotografía aérea del pantano de Valdeinfierno desde aguas abajo de la presa, parte de la colección "postales antiguas de España", exposiciones Tesoros del Ayer. Se desconoce la fecha exacta de la toma. C) Fotografía tomada en diciembre de 1995 extraída de (Poesen et al., 2002). D) Fotografía tomada en febrero de 2011 extraída de (Romero-Díaz et al., 2011). E) Fotografía extraída del fondo de fotografía histórica (Lorca, 2010). Se desconoce la fecha exacta de la toma. F) Fotografía de la presa de Valdeinfierno de los años 40 extraída de (Pascual Vera, 2005). G) Fotografía tomada por el autor de la tesis en Abril de 2010.

Con motivo de la larga serie de avenidas e inundaciones acaecidas sobre la década de 1870, y especialmente la sufrida el día 15 de octubre de 1879 (riada de Santa Teresa), catalogada de altamente catastrófica, se celebró en Murcia, en marzo de 1885, el congreso contra las inundaciones de la región de levante, de cuyas conclusiones se desarrolló un amplio plan de defensa contra las inundaciones titulado “Proyecto de obras de defensa contra las inundaciones en el Valle del Segura”, firmado en el año 1886

La comisión nombrada para su redacción, entre los trabajos propuestos, incluyó la rehabilitación del embalse de Valdeinfierno, con el fin de reducir las puntas de avenida y al mismo tiempo aumentar los recursos hidráulicos para el regadío de Lorca. La citada comisión propuso la reparación de la presa y un recrecimiento de 15 metros de altura, para lo que fue redactado un proyecto que se aprobó por real decreto de 10 de noviembre de 1891, iniciándose las obras en enero de 1892 y finalizado en julio de 1897 (Pelegrín Garrido, 2009).

Debido a la problemática de la pérdida de capacidad del embalse de Valdeinfierno, El CEDEX elaboró distintas batimetrías del embalse. De este modo se sabe que en 1976, el sedimento retenido se encontraba alrededor de los 11Hm^3 (más del 40 % de la capacidad total) (CEDEX, 1976), en 1984 sobre 12.5Hm^3 (50% de la capacidad total) (CEDEX, 1984) y en 1995 sobre 14Hm^3 (cerca del 55% del total) (CEDEX, 1995a). La progresiva pérdida de capacidad del embalse de Valdeinfierno se puede observar en la Figura 2.6.

La presa inicial está construida sobre una base poligonal de siete lados, acercándose mucho su forma a la de una bóveda circular con su convexidad hacia aguas arriba. Fue construida en mampostería con mortero de cal y paramentos de sillería. Se recreció en 1879 con un muro de 15 m por lo que ascendió la capacidad a 21.4Hm^3 . Otras obras más modernas realizadas por la pérdida progresiva de capacidad, han aumentado la misma a los 25Hm^3 actuales (Pelegrín Garrido y García Mariana, 2002).

La importancia y magnitud de los procesos erosivos que se observan en la cuenca de Valdeinfierno, junto con sus características geográficas, hidrológicas y climáticas, suponen un marco ideal para el estudio de los efectos de las avenidas torrenciales sobre la erosión, y como se ven afectados estos fenómenos por los cambios ambientales.

**Capítulo 3: Actividad aluvial y de producción de sedimentos
durante el Holoceno: Aproximación a su significado
paleoambiental a escala secular.**

Introducción

Las regiones Mediterráneas se caracterizan por su elevada sensibilidad a los cambios climáticos y ambientales debido a su frágil equilibrio hidrológico, climático y biológico (Vita-Finzi, 1969; Butzer, 1974, 1975; Thornes et al., 2009). Esta sensibilidad explica la elevada variabilidad de indicadores naturales como sequías, inundaciones, vegetación y erosión en relación con los factores determinantes del cambio global (e.g. clima y actividad humana). En relación con el clima pasado, los registros paleoclimáticos y paleohidrológicos indican que durante la primera mitad del Holoceno la región Mediterránea presentaba condiciones más húmedas que las actuales mientras que a partir de ca. 5000 años se produce una transición hacia condiciones más secas con aumento de la variabilidad hidroclimática (Carrión, 2002; Benito et al., 2014). En el Mediterráneo, estos periodos de elevada variabilidad hidrológica se presentan con una escala temporal de decenal a secular y se caracterizan por un aumento en la frecuencia de eventos extremos (sequías, lluvias intensas e inundaciones) en respuesta a cambios en los patrones de circulación atmosférica (Benito et al., 2008; Corella et al., 2014). Otras causas de cambio ambiental en el pasado están relacionadas con la actividad humana (e.g. deforestación, agricultura y pastoreo) cuyo impacto ha variado en el tiempo y en espacio, resultando difícil su cuantificación a medida que retrocedemos en el tiempo (García Latorre et al., 2001).

Los registros aluviales que rellenan los fondos de valle constituyen la principal evidencia de los episodios de producción de sedimento ocurridos en el pasado, a partir de los cuales se pueden establecer las relaciones causa-efecto que caracterizan la dinámica erosivo-acumulativa en la cuenca alta del Guadalentín. En ambientes de clima mediterráneo, existen numerosos antecedentes en el estudio de secuencias aluviales con el objetivo de descifrar cambios de las condiciones hidro-climáticas y paleoambientales, siendo de destacar los trabajos realizados en Túnez y Marruecos por Faust et al. (2004), Zeilhofer y Faust (2008) y Zielhofer et al., (2008), en el NE de España por Fuller et al. (1996), Peña et al. (2000), Macklin et al., (2006), Sancho et al. (2008). En el SE de España existen diversos antecedentes que permiten completar la secuencia de cambios observados en la cuenca del Guadalentín, particularmente los realizados por Calmel-Avila (1998), Schulte (2002), Silva et al., (2008), Benito et al. (2010) y Baartman et al., (2011). En todos estos trabajos se concluye que la actividad morfo-sedimentaria de los sistemas aluviales en regiones de clima Mediterráneo se debe a una o varias causas, entre las que destacan los cambios en la cubierta vegetal, la inestabilidad de las laderas y la variabilidad climática que puede incrementar la frecuencia de los eventos de precipitación extrema (Sancho et al., 2008; Zielhofer y Faust, 2008). Además, en estas cuencas Mediterráneas existen otros factores extrínsecos e intrínsecos que puede derivar en un incremento de la producción de sedimento como son la acción humana (e.g. Peña et al., 2004) y la tectónica (Silva et al., 2003; Silva et al., 2008), y que deben ser considerados para entender la evolución geomorfológica de los sistemas aluviales.

El objetivo general de este capítulo consiste en determinar las principales fases de producción de sedimento en la cabecera de la Cuenca del Guadalentín durante el Holoceno reciente, y analizar los posibles condicionantes hidroclimáticos, y los cambios ambientales y tectónicos que conducen al incremento de la actividad morfogenéticas aluvial, y que registramos como episodios de agradación aluvial y de incisión. Igualmente, se pretende determinar el papel de los eventos extremos en estos cambios, y entender los cambios hidrológicos y de producción de sedimento actuales dentro de un contexto temporal amplio, de secular a milenario.

Los objetivos concretos de este capítulo son:

- Aportar conocimiento sobre las principales secuencias aluviales en base al análisis geomorfológico y estratigráfico apoyado con dataciones de radiocarbono
- Determinar las posibles causas que desencadena el incremento en la producción de sedimento y la actividad morfogenética, con especial énfasis en los cambios en el clima, actividad tectónica y la actividad humana
- Relacionar los episodios de agradación e incisión detectados en la secuencias aluviales dentro del contexto regional y del SE Ibérico.

3.1. Contexto Regional y Antecedentes

3.1.1. Geología y Geomorfología de la zona de estudio

La zona de estudio comprende la cuenca alta del río Guadalentín, aguas arriba del Embalse de Valdeinfierno. Desde el punto de vista geológico, tal y como se ha indicado en el capítulo anterior, la zona de estudio está ubicada en el extremo oriental de la Cordillera Bética, con dominio de las calizas de edad Jurásica, que conforman los principales relieves que limitan la cuenca, y las margas y margo-calizas del Cretácico y calizas terciarias que ocupan las zonas de fondo de valle en la cuenca estudiada (Baena Perez et al., 1976). Desde el punto de vista estructural se emplaza en la denominada Zona Externa Bética, con dominio del conjunto tectónico-paleogeográfico Subbético, y limitado por el conjunto estructural intermedio conocido como el “Corredor de Chirivel”, que limita al Sur con el conjunto estructural interno Nevado-Filábride (Bousquet, 1979; Vera, 2000 ;Figura 5.1).

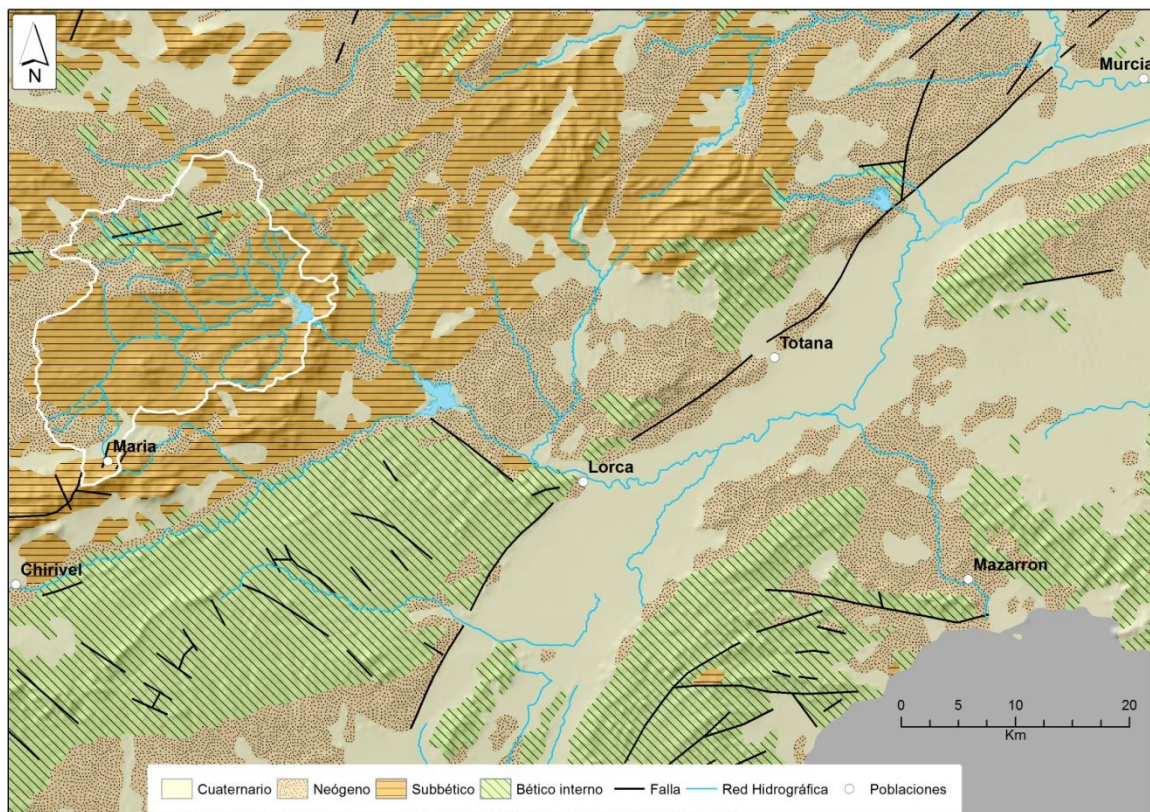


Figura 3.1: Caracterización geológica del área de la cuenca hidrográfica del río Guadalentín, caracterizada como cuenca de drenaje intra-orogénica (modificado de Silva et al., 1996)

La cuenca del Guadalentín se puede considerar como una cuenca de drenaje intraorogénica, con dos sectores de distinto comportamiento morfodinámico (Silva et al., 1996): a) Relieves marginales del sector de cabecera, donde se incluye nuestra zona de estudio, y que presenta un dominio de los procesos erosivos, y b) Depresión del Guadalentín-Sangonera, localizada entre

Lorca y Murcia, con predominio de los procesos sedimentarios (Figura 5.1). Durante el Plioceno-Pleistoceno la morfogénesis aluvial y la incisión del relieve han estado controladas por la actividad tectónica de la Falla de Lorca-Alhama y por el exorreísmo o endorreísmo de la cuenca.

3.1.2. Paleogeografía y evolución del modelado durante el Pleistoceno

En una primera fase, que comprende el Plioceno y Pleistoceno Inferior-Medio, la cuenca tiene carácter exorreico con el curso del paleo-Guadalentín desembocando en el Mediterráneo en las proximidades del antiguo Mar Menor, que ocupaba gran parte del actual Campo de Cartagena (Silva et al., 1996). Durante el Pleistoceno Tardío, la reestructuración tectónica de los márgenes de la Depresión del Guadalentín (zona de Lorca-Totana) generó un cambio hacia un modelo de drenaje endorreico que se mantuvo hasta la mitad del Holoceno (Silva, 1994).

Durante el Plio-Cuaternario, el levantamiento Neógeno de la Dorsal Penibética favorece una fuerte actividad erosiva con desarrollo de abanicos aluviales cuyos vestigios actuales quedan relegados a las Sierras (e.g. Sierra de María) y a las entalladuras de los barrancos (Baena Perez et al., 1976). En las inmediaciones de María los abanicos Pliocenos están constituidos por conglomerados dolomíticos y arcillas rojas con fuerte encostramiento. Durante el Cuaternario tiene lugar una elevación progresiva de esta Dorsal Peni-subbética y un basculamiento de los bloques hacia el norte, como consecuencia del arrastre de estas fallas, con discordancias progresivas internas (deformaciones sinsedimentarias) y exhumación de escarpes de fallas sobre materiales pliocuaternarios (Navarro Hervas y Rodríguez Estrella, 1987). Dentro del contexto de la fase exorreica de inicios del Pleistoceno, se han diferenciado al menos dos niveles de glaciares con importante desarrollo dentro de la cuenca de estudio (Figura 3.2).

El nivel de glaciares superior se encuentra a 110 m sobre el nivel de base actual, siendo su ejemplo más representativo el denominado Llano de Esquivel. Este nivel culminante Pleistoceno formaría parte de un antiguo abanico aluvial procedente del Arroyo del Moral (próximo a la Cueva de Ambrosio), cuyo drenaje se dirige hacia la depresión del actual Embalse de Valdeinfierno. Existen numerosos vestigios de este nivel aluvial alto, aunque la mayor parte queda emplazados próximos a los relieves estructurales más elevados de la Sierra del Oso y Cerro de Gabar. El nivel inferior de glaciares Pleistoceno se encuentra a 60-70 m sobre el nivel de base actual, y presenta un mayor desarrollo longitudinal que el anterior. Este nivel muestra una dirección de drenaje similar al actual, en dirección al sector de Cortijo de Guadalupe. Sin embargo, la conexión entre el sector de María y el sector de Guadalupe se efectuaría a través de un valle más amplio que actualmente conforma una divisoria que se localiza entre el Cerro del Sastre y Cerro del Estanco.

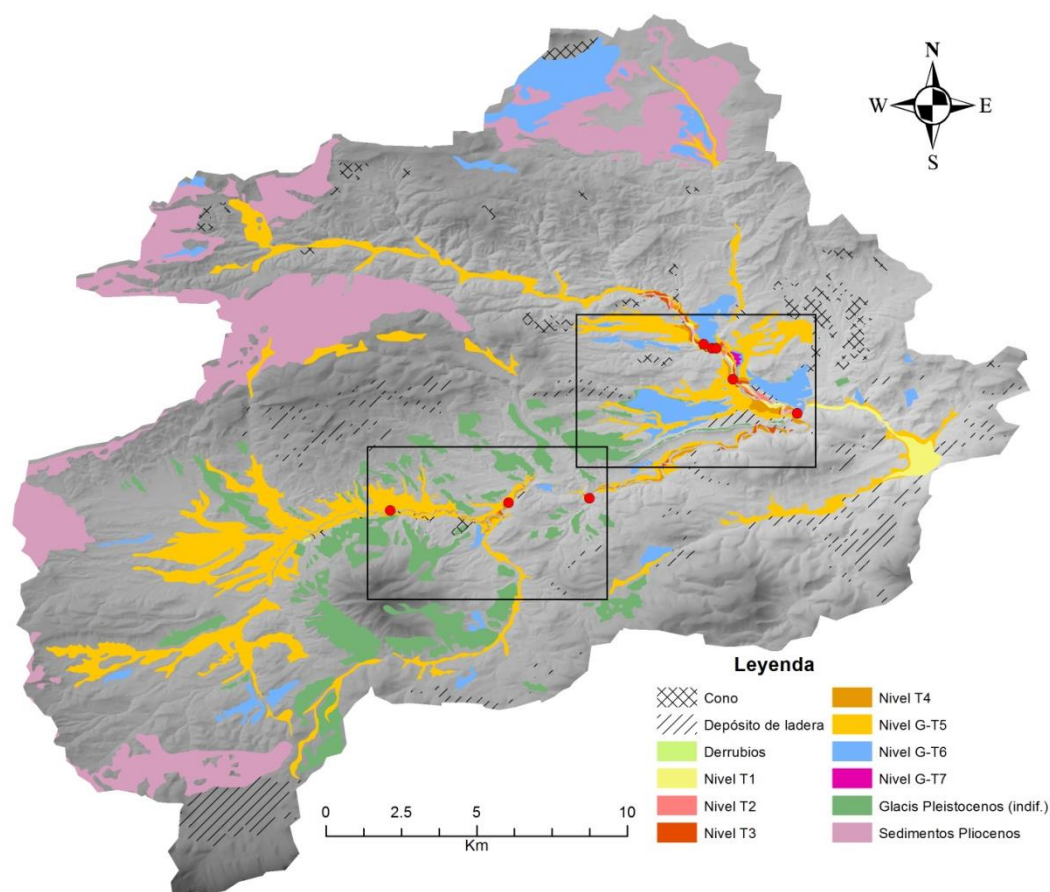


Figura 3.2: Distribución actual de los distintos sedimentos Pliocenos y Cuaternarios en la cuenca de Valdeinfierno. Las dos zonas marcadas comprenden las áreas de María(1; ubicada más al SW) y cortijo de Guadalupe(2; ubicada más al NE) en las que se han levantado columnas y paneles estratigráficos. En la leyenda, los niveles aluviales T se corresponden a terrazas y los G-T a niveles de glaciares-terrazas, numerados correlativamente de más recientes a más antiguos.

Con posterioridad a la acumulación de estos niveles de glaciares culminantes Pleistocenos se produce un largo proceso de vaciamiento de la cuenca alta del Guadalentín relacionado con la elevación de las Sierras de Pericay, Sierra del Gigante y María, durante el Pleistoceno Medio-Superior. La diferencia de gradiente topográfico favorece el cambio en el modelo morfo-sedimentario desde un sistema de deposición aluvial caracterizado por el desarrollo de abanicos aluviales y glaciares a un sistema de incisión fluvial, similar al descrito en cuencas como el Almanzora y Vera (Stokes y Mather, 2003). Ejemplo de este cambio es la incisión antecedente asociada al levantamiento tectónico que genera la profunda garganta excavada por el río Caramel en calizas Jurásicas aguas abajo de la presa de Valdeinfierno, y que conecta la parte alta de la cuenca con el corredor de Chirivel.

Durante el Pleistoceno Tardío la actividad tectónica en los márgenes de la Depresión del Guadalentín en Lorca-Totana favorece el establecimiento de un modelo de drenaje endorreico que ha perdurado hasta el Holoceno medio (Silva, 1994; Silva et al., 2008). En este esquema paleogeográfico, el drenaje de la cabecera del Guadalentín genera un gran abanico aluvial en Lorca que desemboca en una zona endorreica localizada en el sector entre Totana y Librilla,

donde se instala un sistema de *playa-lake* con depresiones fragmentadas que han permanecido hasta época histórica (Silva et al., 2008). La desconexión con los cambios del nivel del mar y la estabilidad del nivel de base en la depresión de Totana-Librilla se traduce en un escaso número de niveles aluviales Pleistocenos que contrasta con la diversidad y desarrollo de los niveles de terraza y glacis de otras zonas del SE como los ríos Antas, Aguas y Alias (Harvey, 2007). Durante la mayor parte del Holoceno se han mantenido las condiciones endorreicas que ha permitido la estabilidad del nivel de base local en la cuenca del Guadalentín, y limitado la incisión y el desarrollo de niveles aluviales encajados y terrazas en el sector de cabecera.

3.1.3. Antecedentes de la historia aluvial holocena de la Cuenca Baja del río Guadalentín

Como se ha indicado anteriormente, la cuenca del Guadalentín se subdivide en una zona de cabecera (zona erosiva) excavada en materiales predominantemente carbonatados subbéticos, y una zona baja (zona de sedimentación) que conforma la Depresión del Guadalentín entre Lorca y Totana. Los estudios realizados anteriormente en la zona baja indican que los principales eventos de incisión asociados al modelado actual ocurrieron a partir del final de la Edad del Bronce (~2500 años cal BP [antes del presente]; Calmel-Avila, 2002). Sin embargo, en el abanico del Lorca las primeras evidencias de incisión se producen en el Calcolítico (~5500-4200 años cal BP), acentuándose con la instalación definitiva del cauce fluvial sobre el abanico del Segura desde el Periodo Musulmán (AD[Años históricos] 831-1243 en Murcia).

La descripción más detallada sobre la evolución de la red fluvial durante el Holoceno corresponde a Silva et al.,(2008). Según estos autores, la secuencia de agradación sobre abanico de Lorca se inician, al menos, en el Holoceno Temprano (antes de ~7900-7700 años cal. BP) y continúa hasta el Calcolítico (~5500-4200 años cal. BP) cuando la interrupción de la sedimentación favorece los asentamientos humanos. La interrupción sedimentaria está relacionada con la incisión (<2 m) de la cabecera del abanico del Lorca en un proceso que se inicia antes de 4527-4628 años cal. BP (Silva et al., 2008). Sin embargo, la disección del abanico no afecta a los tramos medios y distales que continúan presentando secuencias de agradación sobre los niveles pre-calcolíticos. En un primer episodio de relleno parcial de esta incisión durante el Bronce Tardío (~3100 años cal BP) se produce el primer nivel de terraza (+8-9 m) que enlaza con la superficie de un sistema palustre localizado unos 25 km aguas abajo de Lorca, donde alimenta los lóbulos de un abanico distal con edades comprendidas entre el Bronce Tardío (~2700-2500 años cal. BP) y la época Pre-Romana (~2100 años cal. BP). En el segundo ciclo de incisión (~6 m) y relleno (~4-5 m) se genera el nivel de terraza (+6-5m), con excelente desarrollo longitudinal, y depositado durante el periodo Romano (datado en 1720-1900 años cal. BP; Silva et al., 2008). En el sector medio distal del abanico este nivel de terraza presenta en sus términos más recientes una edad Medieval (930-1060 años cal. BP; Silva et al., 2008). Este segundo ciclo de erosión está produce como consecuencia de la erosión remontante

del río Sangonera (como se conoce al Guadalentín entre Murcia y Alhama) y que genera en la Rambla de Librilla una incisión de 15-16 m (Calmel-Avila, 2000; Calmel-Avila, 2002). Esta incisión marca el cambio a unas condiciones de drenaje que conectarían al Guadalentín con el Mediterráneo a través del río Segura (Silva et al., 2008). El tercer ciclo de incisión-relleno genera la terraza de +2-3 m sobre el lecho fluvial, con una edad Medieval tardía (500-700 años cal. BP; Silva et al., 2008), y que se corresponde con un periodo generalizado de agradación fluvial en el SE de España (Calmel-Avila, 2000; Calmel-Avila, 2002; Schulte, 2002).

3.1.4. Ocupación Humana

Los vestigios más antiguos de ocupación humana en la zona de estudio se remontan al Paleolítico Medio (100000 a 32000 años cal. BP) con evidencias de industria lítica y sus fuentes de suministro en filones de sílex localizados a lo largo del cauce del río Caramel (Ripoll López, 1990). La actividad económica de los grupos de neandertales se centra en la recolección de los recursos naturales, la caza y la pesca, demostrando que en la Sierra de María y los Vélez existían suficientes recursos naturales como para subsistir, al igual que sílex para elaborar herramientas. En relación con el Paleolítico Superior (entre 32.000 y 10.000 años), existen importantes evidencias de poblamientos de Homo Sapiens en cavidades rocosas (Cueva de Ambrosio y El Abrigo de los Molinos) con una importante industria lítica y pinturas que ha llevado a la declaración de estas cuevas como Patrimonio de la humanidad. Las primeras excavaciones realizadas en Cueva de Ambrosio se realizaron en 1912 por Breuil y Motos (Breuil y Obermaier, 1914), y ponen en evidencia una dieta a base de especies tales como conejo, cabra hispánica, ciervo y caballo, y la existencia en la zona de lince, gato montés, zorro y lobo (Ripoll López, 1987). La sedimentología indica unas condiciones climáticas húmedas, en un ambiente no excesivamente cálido (Martínez García, 1994).

Durante el Neolítico (10500 a 5000 años cal. BP), la ocupación humana en la cabecera del Guadalentín continúa siendo escasa, existiendo sólo tres yacimientos: Cueva de Ambrosio, Cueva de la Gitana y un hallazgo aislado localizado en las proximidades del río Mula (próximo a Vélez Rubio). En la Cueva de Ambrosio aparecieron numerosas cerámicas, con dos vasijas completas, y huesos de conejo, caballo, toro, ciervo y cabras (Jiménez Navarro, 1962). Estos restos arqueológicos indican una estructura económica de tipo pastoril, perfectamente complementado por la agricultura y asentamientos de carácter estacional (Martínez García, 1994). En relación con la agricultura, en el V milenio se cultivaba la esparilla, la escanda, trigo común y la cebada (Hopf, 1966), aunque no existen evidencias de que se produjera una gran transformación importante del territorio. En el Neolítico final, las comunidades ocupan espacios de alto valor económico y tierras productivas próximas a los cursos fluviales, estableciéndose en pequeños poblamientos al aire libre (Martínez García et al., 1988). El patrón de asentamiento de finales del Neolítico presenta una distribución del hábitat disperso en toda la ladera (e.g. Cerro de Los López, Vélez-Rubio), que se contrapone al de las comunidades del

Cobre, algunas de las cuales muestran un urbanismo incipiente en torno a un concepto común de espacio fortificado (Martínez García, 1994).

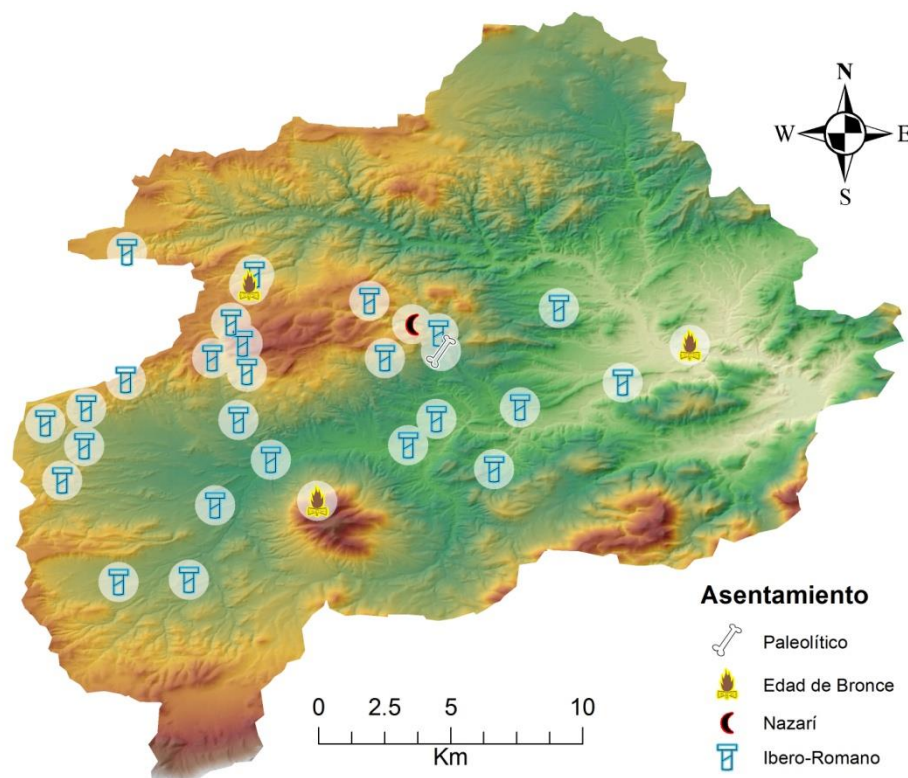


Figura 3.3: Distribución de los asentamientos humanos en la cuenca de Valdeinfierno, caracterizados por el periodo más antiguo del que se tiene constancia de su ocupación. La distribución y edad de los emplazamientos se ha extraído de (Martínez García, 1994), (Martínez López y Muñoz Muñoz, 1999) y (Ocharan Ibarra, 2010).

Las tierras próximas al río Caramel-Alcaide constituyen un paso natural a través de la Hoya del Marqués y el Estrecho del Caramel, donde se alberga algunos poblamientos significativos del Bronce final con continuidad durante el periodo Ibero-romano. La Cueva Haizea, cerca de la confluencia del Alcaide y Rambla Mayor, muestra vestigios de ocupación durante el Bronce y Hierro. Esta vía sigue vigente durante la época Ibero-Romana y constituye una ruta alternativa paralela a la vía Augusta que conectaba *Carthago* (Cartagena) con *Ad-Morum* (actual Vélez-Rubio) a través de Lorca (entonces *Eliocroca*; Figura 3.3). Según Martínez López y Muñoz (1994) existen una significativa relación entre enclaves romanos y las actuales cortijadas de la zona de estudio (Guadalupe, Bizmay). La escasez de material de estos poblamientos romanos indica la continuidad de cierta tradición indígena, aunque con modelo de organización y de propiedad rural típica romana (*villae rusticae*) de medianas propiedades (Pujante Martínez, 2002). La escasez de material durante el Bajo Imperio muestra una crisis y abandono de algunos núcleos en torno al siglo III, y una mayor concentración en los centros estratégicos de Santonge y Cueva de Ambrosio (Martínez López y Muñoz Muñoz, 1987, 1999). Los centros de poblamiento romano tienen igualmente continuidad en periodo árabe (711-1488) con restos de alquerías y núcleos árabes en el Bizmay, la Alquería, Cueva de Ambrosio, el Alcaide, la Alfaguara o la torre del Gabar (Martínez-López, 1988, Figura 3.3). En el periodo árabe Vélez-

Blanco adquiere gran importancia y prueba de ello es la existencia de la fortaleza de Velad Al-Abyadh (Vélez-Blanco). Sin embargo la actividad agrícola se desarrolla principalmente en las zonas próximas a los cursos fluviales, mientras que las zonas marginales se utilizaban para el pastoreo y la caza (Lentisco Puche, 1996). Desde la Conquista de Lorca en 1244 por los reyes Cristianos, la Cuenca del Guadalentín constituyó una zona de frontera, con escasa actividad agrícola que se concentraría en las zonas más próximas a la ciudades (López-Bermúdez et al., 2002). Esta situación continuará hasta 1488 con la conquista de Vélez Blanco, y muy probablemente durante los siglos XVI y XVII debido a la falta de población con apenas 9 habitantes por km² (García Latorre, 1998). A partir del Siglo XVIII y particularmente en el Siglo XIX se produce un importante cambio del territorio con el cultivo extensivo de cereal (hasta el 30% de superficie de cultivo), incluso en zonas marginales, y el aumento importante en la población hasta 20 habitantes por km² (Lentisco Puche, 1996; Sánchez Picón, 1996). El cambio ambiental acelerado producido desde finales del Siglo XVIII incluyó la tala de millones de árboles para el cultivo y la producción de carbón vegetal (Sagasti y Madoz, 1845-1850; Lentisco Puche, 1996; García Latorre et al., 2001). Estos cambios son responsables de la modificación de las condiciones hidrológicas (incremento en los picos de las inundaciones) y en el aumento de las tasas de producción de sedimento (Benito et al., 2010).

3.1.5. Paleoclima Holoceno

Los registros paleoclimáticos del SE de España se basan fundamentalmente en registros de polen en lagos y lagunas de montaña, y algunos registros fluviales y costeros (Pons y Reille, 1988; Jalut et al., 2000; Carrión, 2002; Zazo et al., 2008; Jalut et al., 2009; Carrión et al., 2010). Según Carrión (2002), el inicio del Holoceno (10.000 a 7500 años cal BP) se caracteriza por niveles lacustres bajos en la Sierra de Segura asociados a condiciones secas en un periodo dominado por la crisis hidrológica (picos de sequedad en 9300 y 8400 años cal BP). La crisis de aridez se deja notar en la expansión de la vegetación xerofítica y los frecuentes fuegos que favorecen el reemplazamiento de *Pinus nigra* por *Pinus pinaster* (Carrión, 2002).

El periodo entre ca. 7500 y 5200 años cal BP representa un óptimo mesofítico con desarrollo del bosque de caducifolias *Quercus*, y un mínimo xerofítico, baja frecuencia de incendios y niveles de lagos relativamente elevados (Carrión, 2002). En general se puede considerar como una fase cálida y húmeda, y que hacia el final del periodo tiende hacia el incremento de la sequedad en verano con rasgos característicos del clima Mediterráneo (Carrión et al., 2010). En el río Tajo, la datación de avenidas extremas durante el periodo 6800-6700 años cal BP también indica un aumento de las lluvias de invierno durante el Holoceno medio (Benito et al., 2008). Igualmente, en el Norte de África se registran niveles de lacustres altos con condiciones de humedad elevadas (Hassan, 1997; Gasse, 2000), consistentes con periodos largos de estabilidad fluvial y formación de suelos sobre las llanuras aluviales de Marruecos (Zielhofer y Faust, 2008)

Aproximadamente hace 5000 años se produce un importante cambio con instalación definitiva del clima Mediterráneo, aumento de la frecuencia de los episodios de avenidas extremas y el incremento de la frecuencia de fuegos asociados a crisis de aridez (Carrión et al., 2010; Benito et al., 2014). Durante el periodo 5300-3500 años cal BP se producen alternancias entre *Pinus nigra* vs *Pinus pinaster* y *Quercus perennifolia* (encina), con incremento de los taxones xerofíticos (Carrión, 2002). Entre 3500-2000 años cal BP *P. nigra* se estabiliza con una tendencia al descenso relativo de la vegetación xerofítica (Periodo Húmedo Ibero-Romano) y la estabilización del régimen de fuegos (Carrión, 2002).

Hace ~2000 años cal BP se produce una serie de cambios abruptos en la vegetación, con reducción de *P. nigra* e incremento de las gramíneas que alcanzan el 50% alrededor de 1800 años cal BP. Existen evidencias de polen que indican un aumento de la aridez c. 2200-2000 años cal BP (incremento de *P. aviculare* y *Riccia*, Carrión, 2002). De acuerdo con Carrión (2002), el periodo 1500-500 años cal BP se caracteriza por rápidas alternancias entre *P. nigra* y *Poaceae* (gramíneas). El incremento del polen de gramínea se produce sincrónicamente con pequeños aumentos de *P. pinaster* y encinas. Los últimos 500 años muestran el establecimiento de la vegetación actual caracterizada por bosques abiertos de *P. nigra*, *P. pinaster* y *Q. rotundifolia*, y áreas de gramíneas y arbustos (Carrión et al., 2010).

3.2. Metodología para la determinación del comportamiento de la cuenca

Los episodios de agradación aluvial e incisión que marcan la producción de sedimento en la cuenca se han caracterizado a través del estudio de las unidades morfosedimentarias en el alto Guadalentín (tal como se ha indicado en la Figura 3.2). Estas unidades aluviales se han identificado mediante una cartografía geomorfológica, y el análisis estratigráfico y sedimentológico de los depósitos. Se ha realizado un mapa geomorfológico a escala 1: 25.000, basado en fotointerpretación con fotografías aéreas (serie del año 1956 a escala 1:33.000) y que ha permitido diferenciar las principales superficies aluviales y sus relaciones espaciales de encajamiento y/o superposición. Las superficies aluviales cartografiadas se han identificado en campo y se han establecido las relaciones geomorfológicas y geométricas existentes entre ellas, permitiendo establecer una historia preliminar de las principales fases aluviales, pedogenéticas y de incisión. En los niveles aluviales se han seleccionado perfiles tipo donde se ha levantado una estratigrafía de detalle con descripción de las unidades sedimentarias, y una toma de muestras para la caracterización sedimentológica y la datación, mediante radiocarbono, de restos orgánicos (principalmente carbón vegetal). Igualmente, en estas secuencias se han identificado y analizado los principales suelos tanto enterrados como en superficie, que permiten obtener información sobre los momentos de estabilidad geomorfológica.

Nivel	Tipo de muestra	Cod. Lab.	Edad, ¹⁴ C años BP	Edad calibrada años BP (2σ)	Rango de edad calibrada AD
Cortijo de Diego					
B.2.A	Charcoal	Poz-50673	7880±50	8976-8558BP	7027-6610BC (95.4%)
D-3.d	Charcoal	Poz-50674	7730±35	8582-8430BP	6634-6480BC (95.4%)
G.5.A	Charcoal	Poz-50675	3520±35	3888-3698BP	1939-1748BC (95.4%)
BAS-S1	Suelo	Poz-46851	4250±40	4875-4799BP 4762-4688BP	2926-2870BC (63.4%) 2814-2740BC (25.4%)
BAS-5	Charcoal	Poz-45350	3000±35	3333-3290BP 3258-3069BP	1384-1341BC (9.1%) 1308-1120BC (86.3%)
I.2.a	Charcoal	Poz-50676	655±30	672-626BP 606-556BP 606-556BP	1278-1324 (45.4%) 1344-1394 (50%) 1344-1394 (50%)
Justas/ Balcones/ Morro					
JUS-4	Charcoal	Poz-50666	2285±30	2354-2301BP 2244-2178BP 2168-2162BP	404-352BC (65.5%) 294-229BC (29.0%) 219-213BC (0.9%)
JUS-13	Charcoal	Poz-50667	1990±25	1993-1887BP	44BC-63AD(95.4%)
BALC-9	Charcoal	Poz-50668	1880±30	1884-1728BP	66-222AD (95.4%)
BALC-7	Charcoal	Poz-50670	370±25	500-426BP 392-318BP	1450-1524AD (57.8%) 1558-1632AD (37.6%)
BALC-10	Charcoal	Poz-50671	140±30	281-170BP 152-59BP 42-6BP	1669-1780AD (43.1%) 1798-1891AD (36.8%) 1908-1944AD (15.5%)-
MORRO-9	Charcoal	Poz-50672	765±35	741-662BP	1209-1288AD (95.4%)

Tabla 3.1: Dataciones de radiocarbono de los depósitos del sector de María, y edades calibradas con la curva IntCal_13 para el Hemisferio Norte (Reimer et al., 2013) calibradas calculadas utilizando el programa OXCAL versión 4.2 (Bronk Ramsey,2009). En el código de Laboratorio (Cod. Lab.) se indica el laboratorio donde se ha datado la muestra (Poz: *Poznan Radiocarbon Laboratory*).

Nivel	Tipo de muestra	Cod. Lab.	Edad, ¹⁴ C años BP	Edad calibrada años BP (2σ)	Rango de edad calibrada AD
Cortijo de Guadalupe					
CG-22	Charcoal	Poz-43097	4320±50	5039-4993BP 4986-4826BP	3090-3044BC (7.1%) 3037-2877BC (88.3%)
CG-1	Charcoal	Poz-43098	4415±35	5272-5183BP 5120-5111BP 5066-4866BP	3322-3234BC (12.4%) 3172-3162BC (0.8%) 3116-2917BC (82.1%)
CG-7	Charcoal	Poz-43099	4545±35	5316-5213BP 5190-5052BP	3367-3264BC (36.2%) 3241-3103BC (59.2%)
CG-18	Charcoal	Poz-43100	4550±35	5318-5212BP 5190-5052BP	3370-3264BC (37.7%) 3242-3102BC (57.7%)
CG-19	Charcoal	Poz-43101	4540±35	5314-5212BP 5192-5051BP	3366-3263BC (35.2%) 3243-3102BC (60.2%)
CG-16	Charcoal	Poz-43102	4450±40	5288-5155BP 5144-4956BP 4935-4882BP	3338-3206BC (39.0%) 3196-3007BC (50.7%) 2986-2932BC (5.7%)
CG-10	Charcoal	CNA1415	4515±30	5300-5210BP 5200-5048BP	3352-3260BC (32.7%) 3250-3098BC (62.7%)
Oso/Cerrejil					
OSO-2	Charcoal	CNA1430	1490±30	1416-1306BP	AD 534-644 (92.2%)
OSO-1	Charcoal	CNA1429	270±50	479-269BP 188-148BP	AD 1471-1681 (81.3%) AD 1762-1802 (10.1%)
CER-3	Charcoal	CNA1427	4490±30	5296-5039BP	3348-3090 BC (95.4%)
CER-1	Charcoal	CNA1428	4515±35	5303-5212BP 5196-5048BP	3354-3260 BC (32.4%) 3246-3100 BC (63.0%)
GUA-11-2	Charcoal	CNA1432	3290±35	3609-3446BP	1660-1497BC (95.4%)
Estrecho					
ES-3-T6	Charcoal	UZ-4603	1985±50	2060-1823 BP	111BC (95.4%) 128AD
ES-3-T9	Charcoal	UZ-4660	120±55	281-6 BP	1669-1780AD (38.6%) 1798-1944AD(56.8%)
Vado de la Fuensanta					
MFV-1	Charcoal	Poz-45352	2135±35	2302-2243BP	353-294BC (17.1%) 230-218BC (1.6%) 214-52BC (76.7%)
MFV-2	Charcoal	Poz-45353	2100±35	2290-2278BP 2153-1988BP	340-328BC (1.1%) 204-40BC (94.3%)
MFV-3	Charcoal	CNA1431	2170±30	2309-2105BP 2083-2065BP	360-156BC (92.9%) 134-116BC (2.5%)

Tabla 3.2: Dataciones de radiocarbono de los depósitos del sector de Cortijo de Guadalupe, y edades calibradas con la curva IntCal_13 para el Hemisferio Norte (Reimer et al., 2013) calibradas calculadas utilizando el programa OXCAL versión 4.2 (Bronk Ramsey,2009). En el código de Laboratorio (Cod. Lab.) se indica el laboratorio donde se ha datado la muestra (CNA: Centro Nacional de Aceleradores de Sevilla; Poz: *Poznan Radiocarbon Laboratory*; UZ: *Radiocarbon laboratory of the Department of Geography at the University of Zurich* ;GIUZ).

Para este trabajo se han realizado 30 dataciones de radiocarbono, cuyos análisis se han efectuado en tres laboratorio diferentes (1) Centro Nacional de Aceleradores de Sevilla, (2) *Poznan Radiocarbon Laboratory* y (3) *Radiocarbon laboratory of the Department of Geography at the University of Zurich* (GIUZ). La dataciones de radiocarbono se han calibrado mediante la curva IntCal_13 para el Hemisferio Norte (Reimer et al., 2013) mediante el programa OXCAL versión 4.2 (Bronk Ramsey, 2009 ; Tabla 3.1, Tabla 3.2). Además de estas dataciones se ha recopilado una base de datos con 60 dataciones de radiocarbono de depósitos aluviales de la Cuenca del Guadalentín. Estas dataciones se han procesado mediante el comando Suma del programa OXCAL que genera una curva probabilidad relativa de la distribución de probabilidades del conjunto de las muestras, siguiendo la metodología descrita por Johnstone et al. (2006). La curva de probabilidad relativa indica la probabilidad de deposición de cualquier muestra de la base de datos en un año determinado (Benito et al., 2008). Esta probabilidad relativa de cada conjunto de muestras procesadas tanto para la cabecera del Guadalentín como para el conjunto de la Cuenca se utiliza para definir los periodos de mayor actividad aluvial, teniendo que contar con al menos tres dataciones coincidentes con los picos mostrados en el gráfico de probabilidad. La curva de probabilidad se presenta más adelante en el capítulo (Figura 3.16) puesto que se utiliza para determinar los periodos de erosión/incisión.

3.3. Resultados

Dentro de la propia cuenca de estudio se diferencian desde el punto de vista geomorfológico dos sectores, (1) cabecera del río Alcaide, o Sector de María (Figura 3.4), y (2) zona de confluencia del río Alcaide con la Rambla Mayor que denominamos Sector de Guadalupe (Figura 3.8). Estos sectores están conectados a través de un tramo fuertemente encajado en calizas y tobas volcánicas del Oligoceno-Mioceno, y que ha podido retardar durante el Holoceno la propagación aguas arriba de la incisión por cambio en el nivel de base del río Alcaide.

3.3.1. Sector de María (1)

3.3.1.1. Geomorfología

El sector de María, con una superficie de ca 135 km², comprende la cabecera del río Caramel o del Alcaide hasta el estrechamiento existente próximo al Cortijo de las Juntas. El límite Sur de la cabecera los constituye la Sierra de María (Cerro Poyo 2045 m de altitud), al Norte drena parte de la Sierra del Oso y al Oeste limita con la Cuenca del Guadalquivir, sin que existan relieves de importancia. En su interior se presenta el denominado Cerro de Gabar (1510 m de

altitud) constituido por calizas Jurásicas cuyas laderas vierten en su totalidad a la cabecera del río Caramel.

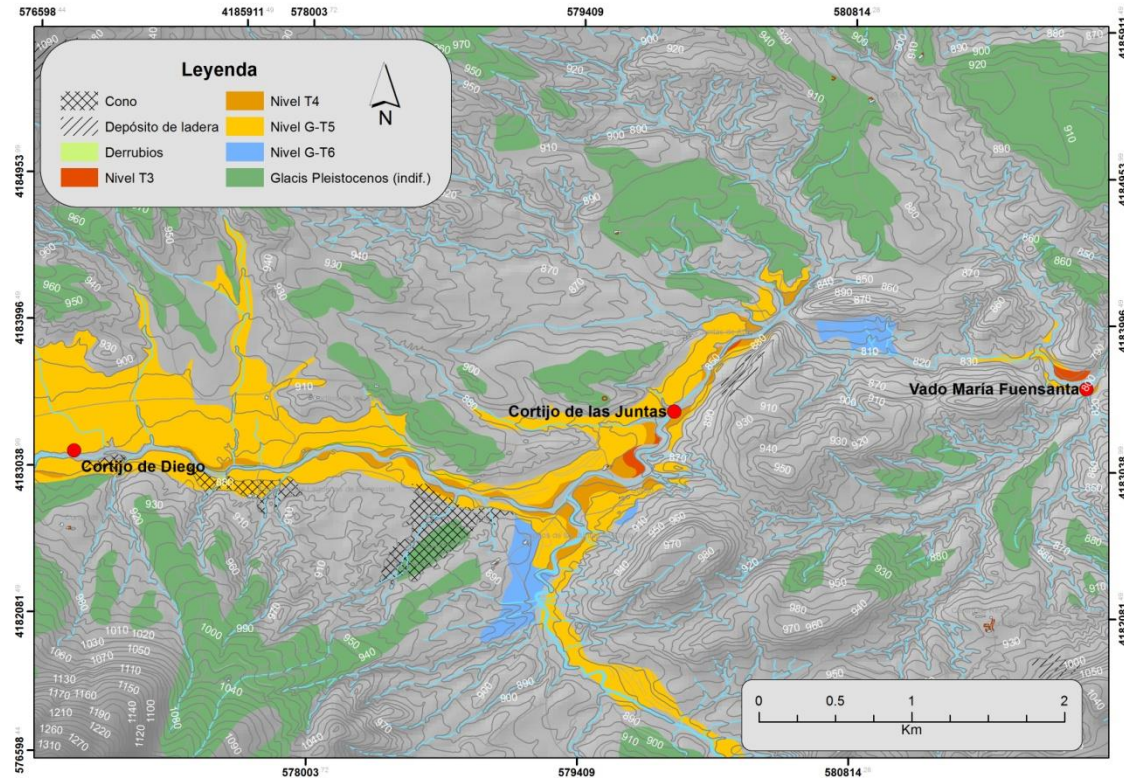


Figura 3.4: Mapa geomorfológico del sector de María (1) en el que se indican los puntos en los que se han levantado las distintas columnas estratigráficas de éste sector (el perfil Vado María Fuensanta corresponde al sector de cortijo de Guadalupe (2)). En la leyenda, los niveles aluviales T se corresponden a terrazas y los G-T a niveles de glacis-terrazza, numerados correlativamente de más recientes a más antiguos. Este mapa se encuentra disponible a mayor resolución en la versión digital

Durante el Holoceno dominan los procesos de agradación y relleno de valle, con desarrollo de abanicos aluviales que conectan las laderas con los fondos de valle. Las secuencias aluviales de aporte lateral aparecen interrumpidas por episodios de estabilidad aluvial y formación de suelos, en ocasiones relacionadas con un escaso drenaje que favorece el encharcamiento de los fondos de valle. En el sector de cabecera de cuenca (sector de María) la agradación aluvial ocupa la mayor parte del Holoceno, mientras que con posterioridad a los 3000 años cal. BP tienen lugar tres ciclos de incisión-relleno que generan tres niveles de terrazas adosadas e insertadas en las terrazas y rellenos anteriores, y que se localizan a una altura de + 6-5m, +5-4m y +3-2 m sobre el nivel de base actual. Estos niveles sólo aparecen desarrollados en la zona próxima al estrechamiento de las Juntas, mientras que aguas arriba apenas aparecen vestigios de niveles de terraza adosados al relleno principal. Por tanto, se trata de una erosión remontante motivada principalmente por un descenso en el nivel de base que no alcanza la totalidad del relleno de valle.

En el sector próximo al Cortijo de las Juntas, estos tres niveles de terraza presentan una altura relativa al curso actual de 6.5 m, 4.2 y 3 m, respectivamente. En estos tres niveles se han

realizado perfiles estratigráficos detallados denominados las Juntas, Balcones y el Morro. Aguas arriba, en el camino que lleva a la Cortijada El Bizmay, estos niveles aterrizados desaparecen, y el encajamiento del río Alcaide se produce sobre el conjunto del relleno aluvial, donde se expone un corte de 11 m de altura donde se presenta la totalidad del depósito Holoceno.

3.3.1.2. Estratigrafía y sedimentología

Perfil Cortijo de Diego

Este perfil sintetiza el relleno Holoceno del sector alto de la cuenca del Guadalentín (sector de María) y se ha realizado a partir de las relaciones geométricas y estratigráficas de los depósitos aluviales acumulados en las proximidades del Cortijo de Diego (Figura 3.5). Este perfil presenta aproximadamente 11 m de espesor y se han identificado 10 unidades.

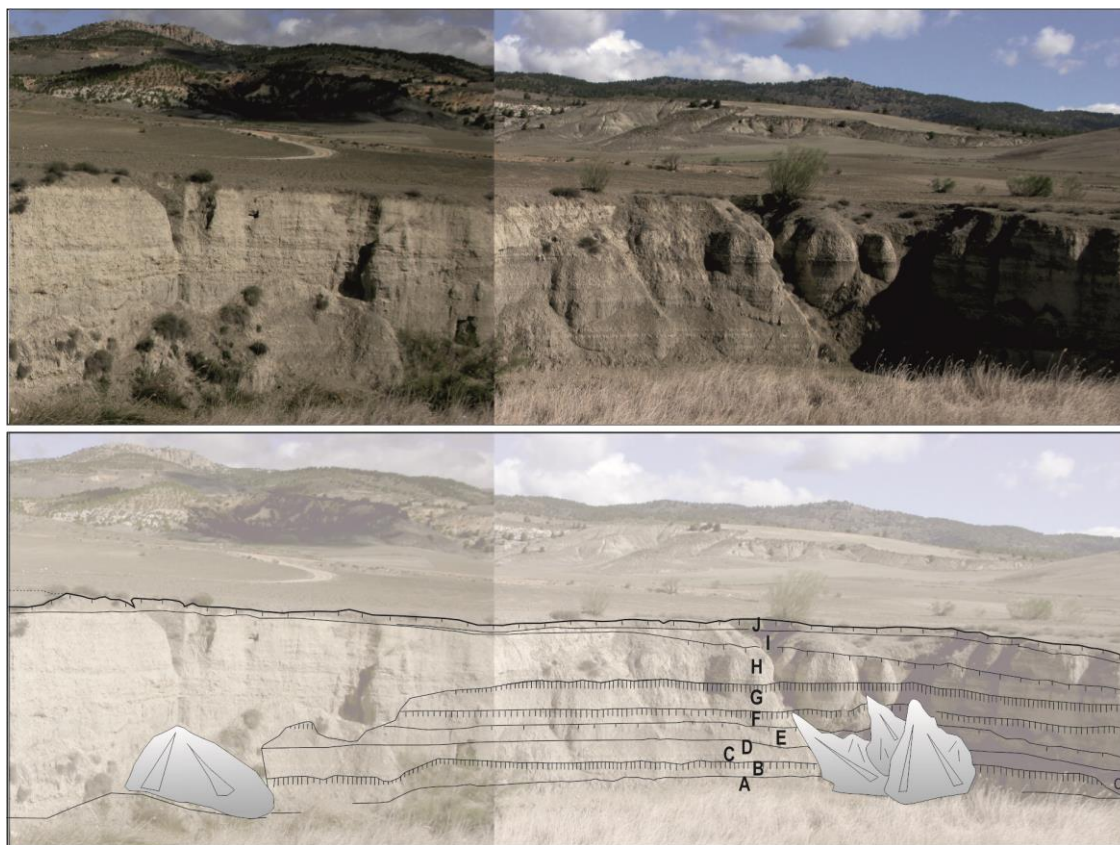


Figura 3.5: Interpretación sobre imagen del afloramiento del Cortijo de Diego, en la que se indican las distintas unidades identificadas en la estratigrafía.

Unidad A (0.4 m de espesor): Se trata de un depósito fluvial. La base de la unidad se asienta sobre un depósito de gravas fluviales con estratificación cruzada. Está constituida por niveles alternantes de arena fina y arcilla de espesor centimétrico (0.5-1 cm), y a techo presentan canales someros de gravilla. Contacto entre unidad A y B se produce mediante un nivel de gravas (5 cm de espesor) con contacto erosivo (C=1.5 cm).

Unidad B (1.75 m de espesor). Está constituido por una alternancia de niveles de limos y arenas muy finas masivos (10-22 cm espesor), intercalados con niveles (2-3 cm) de arena gruesa y gravilla de caliza y sílex. La base de esta unidad corresponde a un abanico aluvial (0.7 m espesor) y culmina con un nivel edafizado con pedotúbulos que ha sido datada con una edad calibrada de 8976-8558 años cal. BP (Tabla 3.1). En el tramo intermedio (0.5 m espesor) se presentan cuatro niveles (cada uno de 12-16 cm potencia) de limos y arena fina con evidencias de exposición aérea (pedotúbulos) en su parte superior. La parte superior (0.5 m) está compuesta por un nivel de arena fina media con laminación paralela donde se ha formado un suelo oscuro de carácter vértico bien desarrollado con excelente continuidad lateral.

Unidades C y D (1.3-1.5 m). Representa la primera fase de incisión principal del relleno que erosiona el suelo desarrollado en la unidad anterior y las unidades A-B. Está formado por un nivel basal (0.6-0.7 m de espesor) de gravas y bloques (C: 22 cm y modas de 1 cm y 3-5 cm) con forma de canal que alternan con niveles de limo y arcilla. Las gravas incluyen cantos blandos de arcilla oscura arrancados del suelo anterior. A techo (unidad D) está constituido por varios conjuntos que contienen niveles de arenas y limos con laminación paralela en su base y terminan con una lámina (2-7 cm) de arcilla y limo. Se ha datado con radiocarbono el último de los niveles proporcionando una edad calibrada de 8582-8430 años cal. BP (Tabla 3.1).

Unidades E (espesor 1.1 m), F (0.7 m), G (1.75 m). En estas unidades se repiten las secuencias que están formados por arenas y limos masivos con gravillas flotadas en la base y hacia techo presentan niveles de gravilla y gravas (centilo 6-7 cm) con base erosiva. Hacia techo de la unidad F y G se encuentran desarrollados dos suelos de carácter vértico. El suelo de F tiene color 10YR5/1 en seco y 10YR4/1 en húmedo con cutanes). Los ácidos húmicos de este suelo se han extraído y han sido datados con radiocarbono obteniéndose una edad calibrada de 4875-4690 años cal. BP (Tabla 3.1). El contacto entre unidad F y G está bien marcado por un nivel residual de gravas de caliza rosa (*lag* con espesor de 5 y 7 cm) provenientes de la cabecera de la cuenca. La unidad G presenta el suelo 3 bien desarrollado en toda la zona. Este suelo (espesor de 50 cm), de color similar al anterior, presenta características vérticas y estructura angular con tendencia a prismática media. Un resto de carbón vegetal de este suelo ha proporcionado una edad calibrada de 3888-3698 años cal. BP (Tabla 3.1).

Unidad H (entre 3 m y 7.3 m de potencia). Esta unidad aparece localmente incidiendo las unidades anteriores, correspondiendo a la segunda fase erosiva principal identificada en el relleno aluvial. Por tanto, en ocasiones se encuentra superpuesta a la unidad G con hasta 3 m de espesor, pero lateralmente se incide sobre el relleno del valle, alcanzando un espesor de 7.3 m. La base, con espesor de 2.30 m, está constituida por niveles canaliformes de bloques y gravas con estratificación cruzada (C:12-17 cm y modas de 1 cm y 3-6 cm). Sobre los canales de gravas se observan dos niveles con arenas y limos masivos (2 m de espesor), mientras que los 3 m superiores están caracterizados por alternancia de niveles de arenas y limos (10-30 cm) en estratos tabulares con base erosiva, que en ocasiones están interrumpidos por niveles de gravas (10-20 cm de espesor). En la parte superior se observan niveles de arena culminados con láminas de arcilla con grietas de retracción y pedotúbulos. Estos depósitos pueden interpretarse

como una secuencia de abanico aluvial inicialmente asociadas al funcionamiento torrencial de los barrancos laterales (canales de gravas e incisión asociada) y en los términos superiores representan *sand flat-mud flat* (llanuras arenosas-lutíticas) generados por flujos laminares procedentes de estos abanicos aluviales. La datación de un carbón vegetal en esta unidad ha proporcionado una edad calibrada de 3330-3070 años cal. BP (Tabla 3.1). En la parte superior de la unidad H se retoma la actividad fluvial de aporte longitudinal desde la cabecera del valle.

Unidad I (1.6 m de espesor). Se trata de una unidad constituida por tres unidades limo arcillosas de estructura masiva y bioturbación a techo, con interrupciones de tres niveles centimétricos de gravillas. El techo de la unidad se presenta un suelo incipiente de donde se ha extraído un resto de carbón vegetal que ha proporcionado una edad calibrada de 670-555 años cal. BP (Tabla 3.1).

Unidad J (0.5 m de espesor). Comprende limos y arenas con cantos dispersos, con un elevado grado de remoción y antropización por las prácticas agrícolas de superficie (Horizonte Ap).

Cortijo Juntas de Abajo

El relleno holoceno descrito en el perfil cortijo de Diego se encuentra incidido por el río Caramel o del Alcaide. Cerca del cortijo de las Juntas de abajo, esta incisión muestra en su interior tres niveles aluviales aterrazados insertados unos en otros, y a su vez adosados a un relieve de calizas del Paleógeno (Figura 3.6 y Figura 3.7). Estos niveles morfo-sedimentarios se han descrito en tres perfiles estratigráficos denominados Juntas, Balcones y Morro (Figura 3.7).

- **Perfil de las Juntas**

Esta sección se ha levantado en la zona más próxima al relieve paleógeno. La secuencia de eventos fluviales alcanza un espesor cercano a los 5.70 m. En todo este conjunto de sedimentos se han podido reconocer numerosos eventos de inundación y varios eventos de ladera. Las texturas a lo largo de toda la sección muestran importantes variaciones de tamaño de grano.

El conjunto basal tiene una potencia de 1.5 m y está compuesto por secuencias de arenas muy finas y limos, con espesores comprendidos entre 1 y 2 cm (Figura 3.7). Su base es ligeramente irregular y están constituidas por un doblete con términos bien diferenciados. El término inferior está compuesto por arenas muy finas con laminación paralela y/o *ripples* mientras que el término superior lo forman limos. En ambos términos es habitual encontrar una notable acumulación de restos vegetales macerados y de carbón vegetal (*charcoal*). Se interpreta como un depósito fluvial cuya sedimentación se produciría de forma rápida y en condiciones de baja energía sobre una llanura de inundación o rellenando una zona de remanso en el margen del valle. En la parte intermedia de este conjunto basal se ha datado un resto de carbón vegetal indicando una edad calibrada de 2350-2160 años cal. BP (Tabla 3.1).

En el tramo intermedio (2 m de espesor) se presentan entradas de material de la ladera en los primeros 60 cm compuestos por gravas angulosas que alternan con arenas finas fluviales. A estos se superponen (espesor total de 1.4 m) siete secuencias fluviales granodecrecientes (entre 15 cm y 40 cm de potencia), con un nivel de arena gruesa-muy gruesa en la base que pasa a arena media y fina con estructuras de corriente (estratificación cruzada en surco o *ripples*), que en la vertical evoluciona a arena fina y muy fina con laminación paralela, culminando con una lámina fina de limo masivo y arcilla con huellas de raíces. En la parte superior de este tramo se presentan tres niveles de arena fina y limo masivos, cada uno culminado con un suelo incipiente y huellas de bioturbación por raíces, que corresponderían a términos de llanura de inundación. El tramo superior presenta un contacto erosivo sobre el intermedio, indicando un posible hiato. La parte baja se compone de dos secuencias con espesores de 25 y 17 cm constituidos por gravas (moda de 2-3 cm) con estratificación cruzada que terminan en arenas finas y signos de exposición sub-aérea a techo. Sobre estas secuencias se presentan 60 cm de arenas de finas a gruesa poco clasificadas, con laminación paralela, y restos de gasterópodos y carbón vegetal. En este término superior se ha datado un resto de carbón indicado una edad calibrada de 1993-1887 años cal. BP (Tabla 3.1). Por encima del tramo superior se presentan 50 cm de depósitos de ladera compuestos por gravas, arenas y limos, con base erosiva.

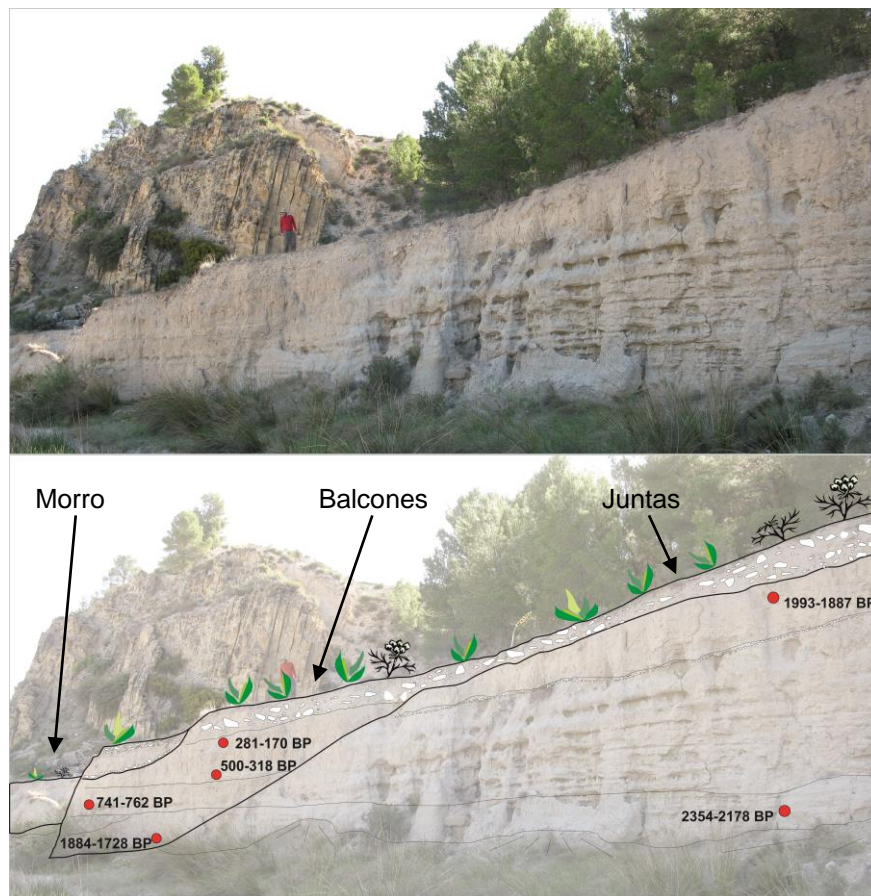


Figura 3.6: Interpretación de los tres niveles aterrazados identificados en la zona Cortijo de Juntas de Abajo, incluyendo algunos de los niveles identificados en las distintas unidades del afloramiento, así como las edades determinadas mediante las distintas dataciones (dadas en años calibrados B.P.).

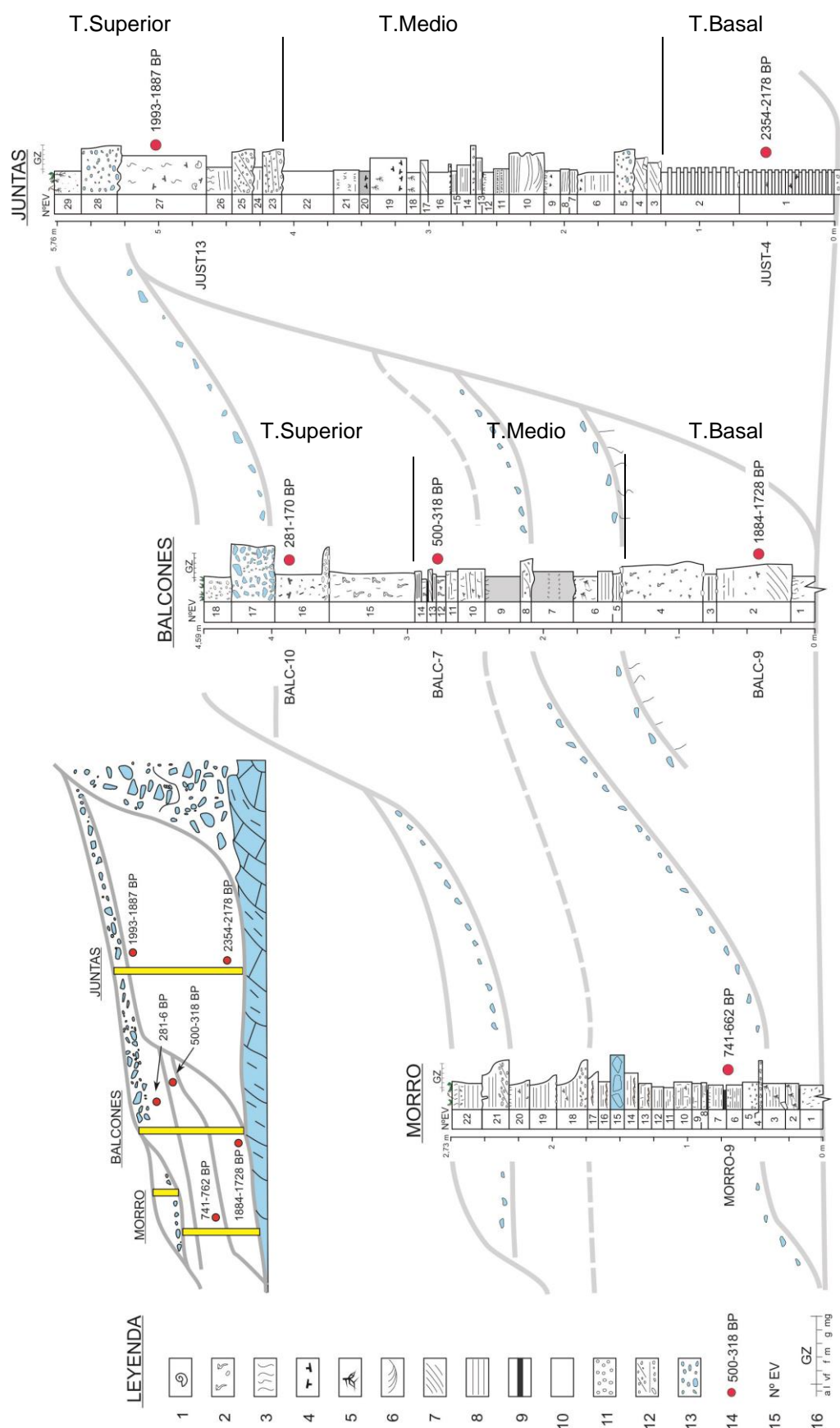


Figura 3.7: Panel estratigráfico con las columnas estratigráficas detalladas y esquema de los tres niveles aterrazados e insertados, identificados en la zona Cortijo de Juntas de Abajo(dadas en años calibrados B.P.).

- **Perfil Los Balcones**

Se trata de un nivel adosado al depósito del perfil de las Juntas, con un contacto erosivo que indica la incisión del nivel de las Juntas y posterior agradación del perfil Los Balcones.

Este perfil se estructura en tres conjuntos (Figura 3.7). El basal presenta 70 cm de espesor y está compuesto por una secuencia fluvial granodecreciente de arenas medias y gruesas con estratificación cruzada en la base y arena fina y muy fina con laminación paralela a techo. En la base se ha datado un resto de carbón obteniéndose una edad 1884-1728 años cal. BP (Tabla 3.1). Por encima se sitúa un depósito de 60 cm de espesor compuesto por una mezcla de arena media y gruesa con gránulos flotando, restos de carbón y pedotúbulos, que indica una clara influencia de material de ladera y una escasa actividad fluvial a pesar de situarse próximo al cauce.

En el conjunto intermedio se caracteriza por una reactivación de la actividad fluvial, y entradas ocasionales de depósitos laterales de ladera. En su parte basal, se muestran dos unidades de arenas medias y finas con laminación paralela y que terminan en arenas muy finas y limos con marcas de bioturbación. Por encima se observan 50 cm de depósitos de ladera, con arenas medias y finas y entradas de niveles de cantos, gravillas y gravas. Por encima se sitúan al menos seis niveles de arenas finas y muy finas con limos, con laminación paralela y *ripples* que se interpretan como depósitos de inundación en zona de remanso. La datación de uno de estos niveles a techo de este conjunto presenta una edad calibrada de 500-426 años cal. BP (Tabla 3.1).

En el conjunto superior se muestran tres unidades relacionados con aportes de la ladera, y compuestos por arena media, fina y limo, con cantos flotando y pedotúbulos, que en la unidad inferior están calcificados indicando una tendencia a las condiciones áridas. El techo de la unidad intermedia se ha datado con una edad calibrada de 281-170 años cal. BP (Tabla 3.1).

- **Perfil El Morro**

Este perfil muestra una secuencia completa de eventos de inundación alcanza un espesor cercano a los 2.75 m. En todo el conjunto de sedimentos se han podido reconocer un mínimo de 12 eventos de inundación, con intercalaciones de depósitos de ladera. Las texturas a lo largo de toda la sección muestran variaciones de tamaño de grano, pero las más frecuentes son las arenas de grano fino y muy fino, organizadas en secuencias que terminan con limos. Destacar la abundancia de *charcoal* y de materia vegetal dispersa en toda la sección. Se han diferenciado los siguientes tipos de secuencias:

- a) Secuencias compuestas por arenas finas o muy finas, y limos, con espesores comprendidos entre 17 y 5 cm. Su base es ligeramente irregular y, en ocasiones, erosiva. Están constituidas por un doblete con términos bien diferenciados. El inferior compuesto por arenas finas con *ripples* de corriente y más frecuentemente por

laminación paralela. El término superior, lo forman arenas de grano muy fino y limos. Son abundantes los restos vegetales macerados dispersos, ocasionalmente más abundantes en el techo de la secuencia, y la bioturbación producida por pequeñas raíces. En algunos casos se observan grietas de desecación que marcan el fin de la secuencia.

- b) Secuencias granodecrecientes de arenas de grano medio, ocasionalmente muy gruesas o microconglomerados, y arenas muy finas. Presentan espesores entre 15 y 25 cm. La base es irregular. Presentan laminación paralela con restos vegetales macerados dispersos y bioturbación en el techo
- c) Secuencias de arenas de grano muy fino, ocasionalmente con gránulos dispersos. Su espesor varía entre los 11 y los 16 cm. En ocasiones contienen restos vegetales. Las arenas presentan una apariencia masiva y es frecuente la existencia de bioturbación producida por pequeñas raíces. Terminan con un nivel de limos carbonatados blancos de algunos mm de espesor y de forma ocasional, con grietas de desecación.
- d) Secuencias granodecrecientes compuestas por arenas muy gruesas y medias con un espesor de 20 cm. La base es irregular. La secuencia comienza con laminación cruzada planar con gránulos y guijas en las láminas. En la vertical evoluciona a laminación paralela. El techo muestra bioturbación con rúbulos verticales.

En la base del perfil se ha datado fragmento de carbón vegetal que ha proporcionado una edad calibrada de 741-662 años cal. BP (Tabla 3.1).

3.3.2. Sector del Cortijo de Guadalupe

3.3.2.1. Geomorfología

El sector de Cortijo de Guadalupe incluye el sector localizado aguas arriba de la confluencia de Rambla Mayor y río Alcaide-Caramel. La Rambla Mayor es un curso efímero con una cuenca de drenaje de ~145 km² de superficie, y con un fuerte encajamiento entre la Sierra del Oso y la Sierra Áspera. La cabecera se localiza sobre el altiplano que drena a través del Río Orce hacia el Guadiana Menor. El fuerte encajamiento de Rambla Mayor ha estado favorecido por una elevada tasa de erosión remontante de su cabecera resultado de los mayores gradientes de la cuenca del Guadalentín. Igualmente, la Rambla Mayor atraviesa en esta zona materiales fácilmente erosionables del Triásico (facies *Keuper*) favoreciendo su incisión. La fuerte incisión de la Rambla Mayor entre las Sierras del Oso y Áspera impide la extensión de los depósitos aluviales, excepto en el tramo próximo a la confluencia con el Río del Alcaide o Caramel. En este tramo, las margas y arcillas del Cretácico han sido erosionadas y permiten el desarrollo de

niveles de glaciares, derrames y rellenos de valle de mayor extensión. Se han diferenciado hasta siete niveles aluviales. Los derrames y rellenos de valle se componen de cinco niveles que cerca del curso de Rambla Mayor y del Río del Alcaide se presentan formando bancos o terrazas. Los niveles más altos presentan una morfología en glacis de elevado desarrollo longitudinal y arrancan desde los relieves circundantes parece enrasar con algunas de las divisorias actuales cerca del estrecho.

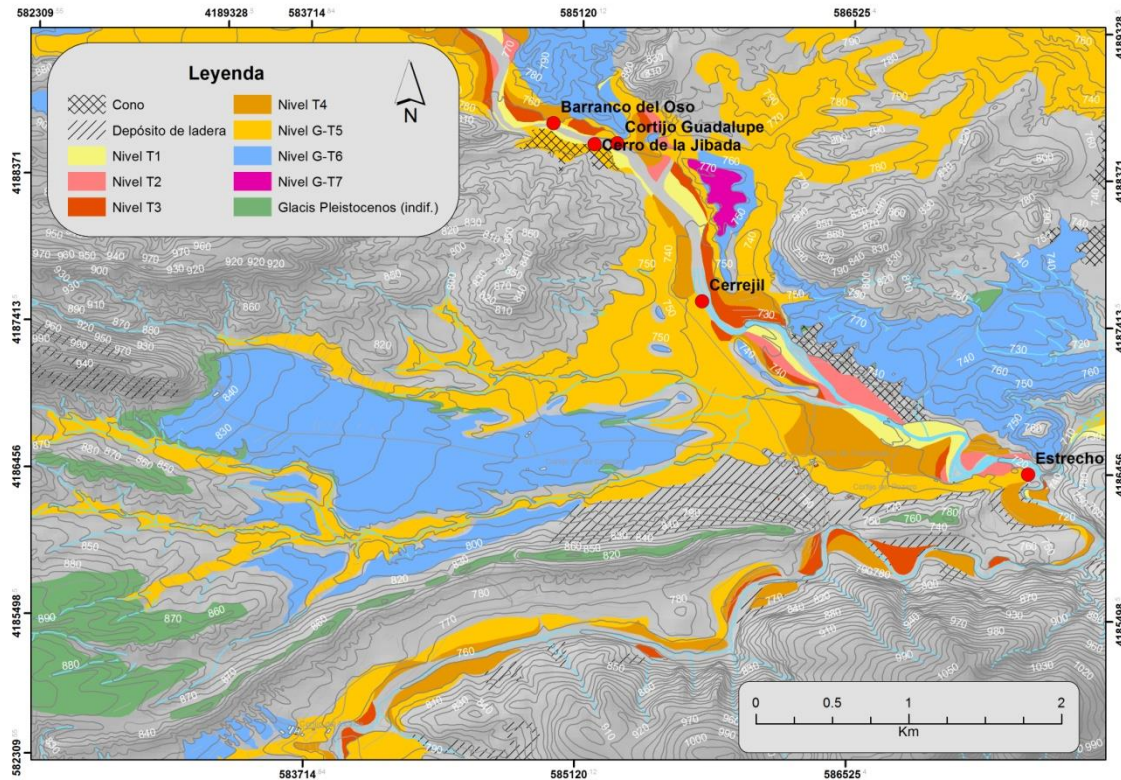


Figura 3.8: Mapa geomorfológico del sector de cortijo de Guadalupe (2) en el que se indican los puntos en los que se han levantado las distintas columnas estratigráficas de éste sector. En la leyenda, los niveles aluviales T se corresponden a terrazas y los G-T a niveles de glacis-terrazza, numerados correlativamente de más recientes a más antiguos. Este mapa se encuentra disponible a mayor resolución en la versión digital

3.3.2.2. *Estratigrafía y sedimentología*

El comportamiento erosivo diferenciado entre la parte más alta de la Rambla Mayor y la confluencia con el río Caramel conlleva una clara diferenciación entre la estratigrafía de estas dos zonas. Dicha diferenciación hace que mientras que los perfiles de cortijo de Guadalupe, Barranco del Oso, Cerro de la Jibada y Cerrejil mantienen similitudes entre sus secuencias y niveles sedimentarios, estas no se observan en los afloramientos Estrecho y Vado María Fuensanta. Con el objetivo de facilitar la lectura del apartado, la organización de las descripciones estratigráficas se ha elaborado separando los perfiles de la parte alta de la Rambla Mayor (Figura 3.9) con el de la parte baja (Estrecho) y el del Vado María Fuensanta.

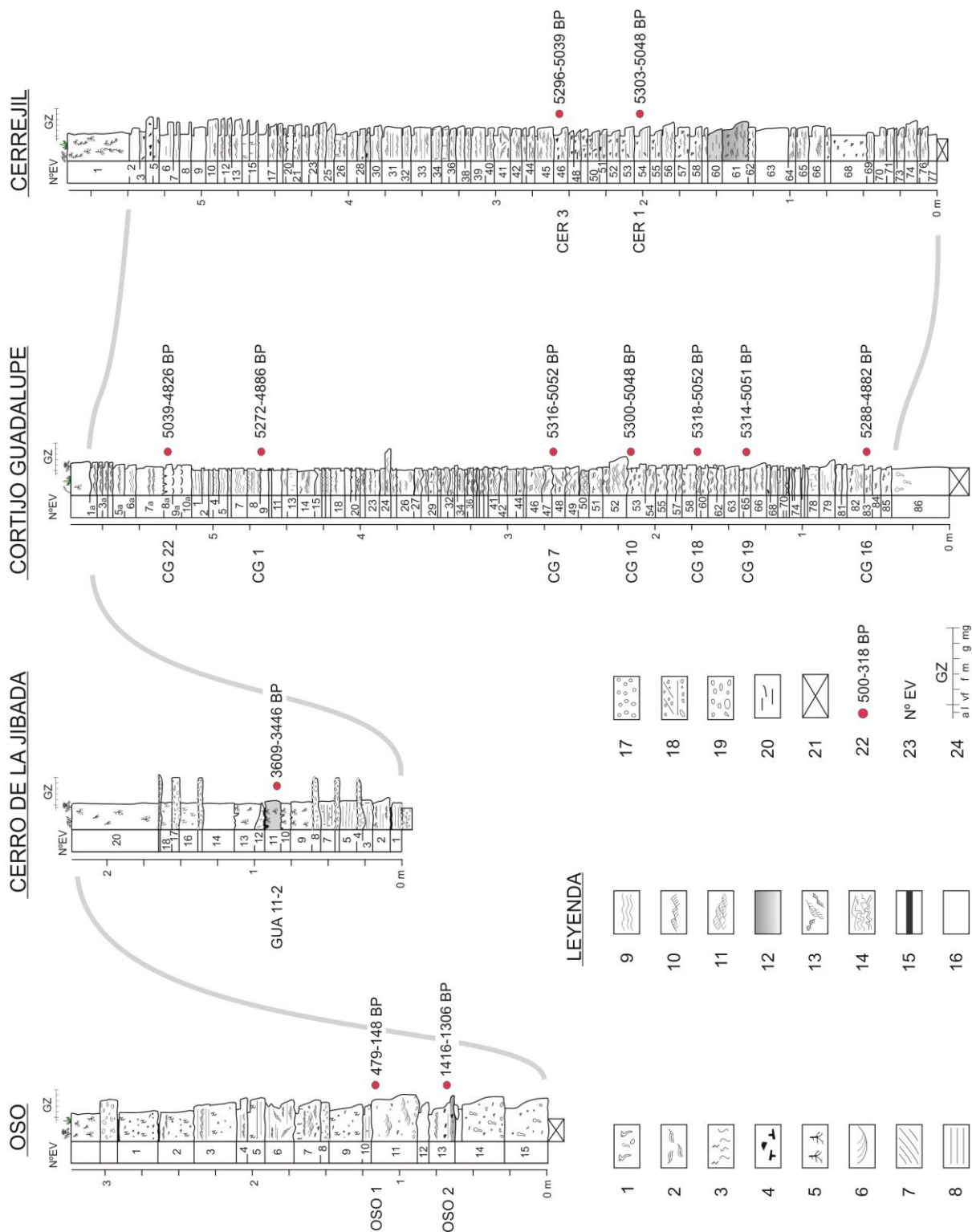


Figura 3.9: Panel estratigráfico en el que se conectan las columnas de los distintos afloramientos de la parte alta de la rambla Mayor. El panel incluye los distintos estratos comunes presentes en las secuencias descritas, así como los niveles que han sido datados mediante radiocarbono (Edad en años calibrados B.P.).

- **Perfil de Cortijo de Guadalupe**

En la margen derecha de Rambla Mayor, y próximo a la confluencia con la Rambla Cantar, se presenta un depósito aluvial con un espesor cercano a los 5.80 m. En todo este conjunto de sedimentos se han podido reconocer un mínimo de 86 unidades que se interpretan como eventos de inundación. Las texturas a lo largo de toda la sección muestran escasas variaciones de tamaño de grano, siendo los más frecuentes las arenas de grano fino y muy fino, organizadas en secuencias que terminan con limos. De forma ocasional se observa una fina lámina de arcilla que marca el final de la secuencia y el límite con la siguiente. Hay que destacar la abundancia de *charcoal* y de materia vegetal dispersa en toda la sección (Figura 3.9).

En las secuencias de inundación se han diferenciado los siguientes tipos:

- a) Secuencias granodecrecientes compuestas por arenas finas, muy finas y limos, con espesores comprendidos entre 12 y 5 cm. Su base es ligeramente irregular y, en ocasiones, erosiva. Están constituidas por un doblete con términos bien diferenciados. El inferior está compuesto por arenas finas con *ripples* de corriente y/o por laminación paralela. El término superior, lo forman arenas de grano muy fino y limos en los que es habitual encontrar una notable acumulación restos vegetales macerados. Son frecuentes también las grietas de desecación.
- b) Secuencias de arenas de grano muy fino cuyo espesor oscila entre los 7 y los 3 cm. En ocasiones contienen restos vegetales. Terminan con un nivel de limos carbonatados blancos de entre 1 cm y algunos mm de espesor y de forma ocasional, con grietas de desecación. En algunas secuencias se observa bioturbación producida por pequeñas raíces.
- c) Secuencias granodecrecientes de arenas de tamaño comprendido entre medio y fino y con espesores que oscilan entre 6 y 8 cm. La base es irregular y a veces claramente erosiva. La organización interna muestra *climbing ripples* en deriva que evolucionan en la vertical a *climbing ripples* en fase. En el techo suelen presentar un nivel de limos de espesor variable, pero en general, inferior al cm. Las grietas de desecación y la bioturbación que marcan el límite superior de las secuencias, son también estructuras frecuentes.
- d) Secuencias granodecrecientes de arena de tamaño grueso o medio que terminan con arenas de tamaño fino. Su espesor oscila entre los 15 y 8 cm. La base es irregular o erosiva. La organización interna está constituida por antidunas (Figura 3.10 B), laminación paralela y *ripples* de corriente. Cuando las secuencias aparecen completas presentan un término final de limos blancos de espesor milimétrico.

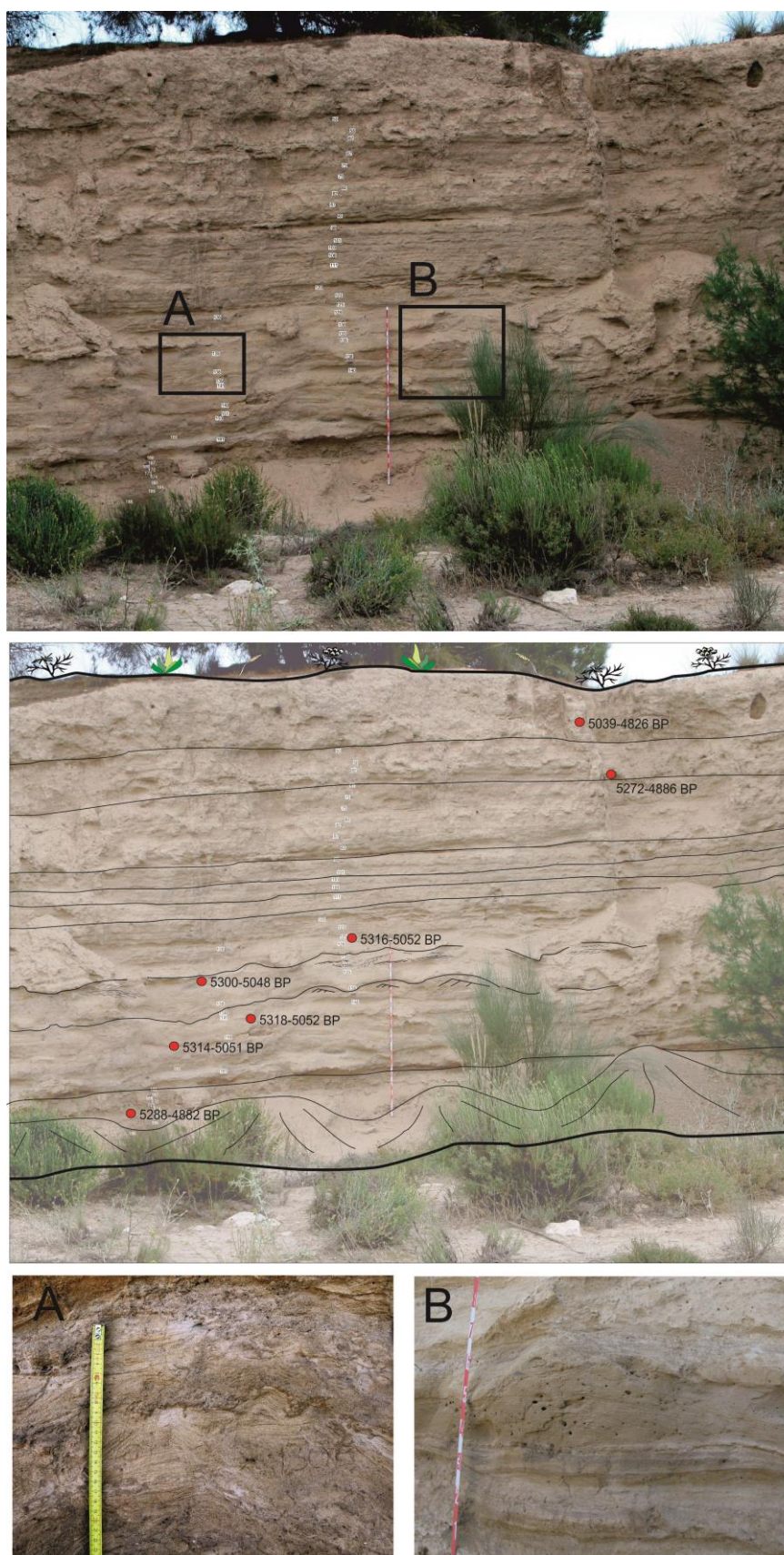


Figura 3.10: Interpretación sobre imagen del afloramiento del Cortijo de Guadalupe, en la que se indican las edades determinadas mediante las distintas dataciones y algunos de los niveles descritos en las distintas secuencias. A: detalle de niveles deformados. B: detalle de nivel de antidunas (Edad en años calibrados B.P.).

En los eventos 47, 48 y 49, de esta sección las estructuras sedimentarias, generalmente *ripples* de corriente y laminación paralela, presentan una fuerte deformación no atribuible a fenómenos de escape de fluidos. Algunos niveles aparecen girados, incluso invertidos, y con geometrías que no responden a ningún tipo de equilibrio con las condiciones hidráulicas de formación conocidas para este tipo de estructuras sedimentarias. Se deben a algún tipo de proceso sin o penecontemporaneo con la sedimentación que provocó este tipo alteración en la disposición normal de las estructuras e incluso algunas microfallas (Figura 3.10 A). Tampoco se trata de deformaciones puntuales, puesto que tienen una continuidad lateral notable y pueden seguirse a lo largo de todo el afloramiento considerado (Figura 3.10). Aunque no se han estudiado en detalle, este tipo de deformaciones son similares a las descritas por numerosos autores como producto de alteraciones en los sedimentos producidas por sismos de intensidad mayor o igual a 5 en la cuenca del río Segura (Masana et al., 2004; Rodríguez-Pascua, 2005).

En este perfil se han datado siete muestras de radiocarbono obteniéndose edades coherentes con la estratigrafía (Figura 3.10). El inicio de la sedimentación se produciría entre unos 5300 y 5000 años cal BP (Tabla 3.2), y terminaría entre 4980 y 4825 años cal BP. Por tanto, se trata de depósito que se acumularía de forma rápida en un periodo que podría oscilar entre 20 años y 475 años, teniendo en cuenta el rango más corto y más largo de edad resultantes de las dataciones. Las tasas medias de acumulación de este depósito están comprendidas entre 29 cm/año y 1.2 cm/año, que incluso en el rango inferior se pueden considerar elevadas.

- **Perfil del Cerrejil**

En este punto de la margen derecha de la Rambla Mayor, la secuencia completa de eventos de inundación alcanza un espesor cercano a los 6 m (Figura 3.11). En todo este conjunto de sedimentos se han podido diferenciar un mínimo de 77 eventos. Las texturas a lo largo de toda la sección muestran escasas variaciones de tamaño de grano. Las más frecuentes son arenas de grano fino y muy fino, organizadas en secuencias que terminan con limos. De forma ocasional se observa una fina lámina de arcilla que marca el final de la secuencia y el límite con la siguiente (Figura 3.9). Hay que destacar la abundancia de *charcoal* y de materia vegetal dispersa en toda la sección (Figura 3.11 B).

En las secuencias de inundación se han diferenciado los siguientes tipos:

- a) Secuencias granodecrecientes compuestas por arenas finas, muy finas y limos, con espesores comprendidos entre 12 y 5 cm. Su base es ligeramente irregular y, en ocasiones, erosiva. Están constituidas por un doblete con términos bien diferenciados. El inferior está compuesto por arenas finas con *ripples* de corriente y con frecuencia por laminación paralela. El término superior, lo forman arenas de grano muy fino y limos, en los que es habitual encontrar una notable acumulación restos vegetales macerados y grietas de desecación.

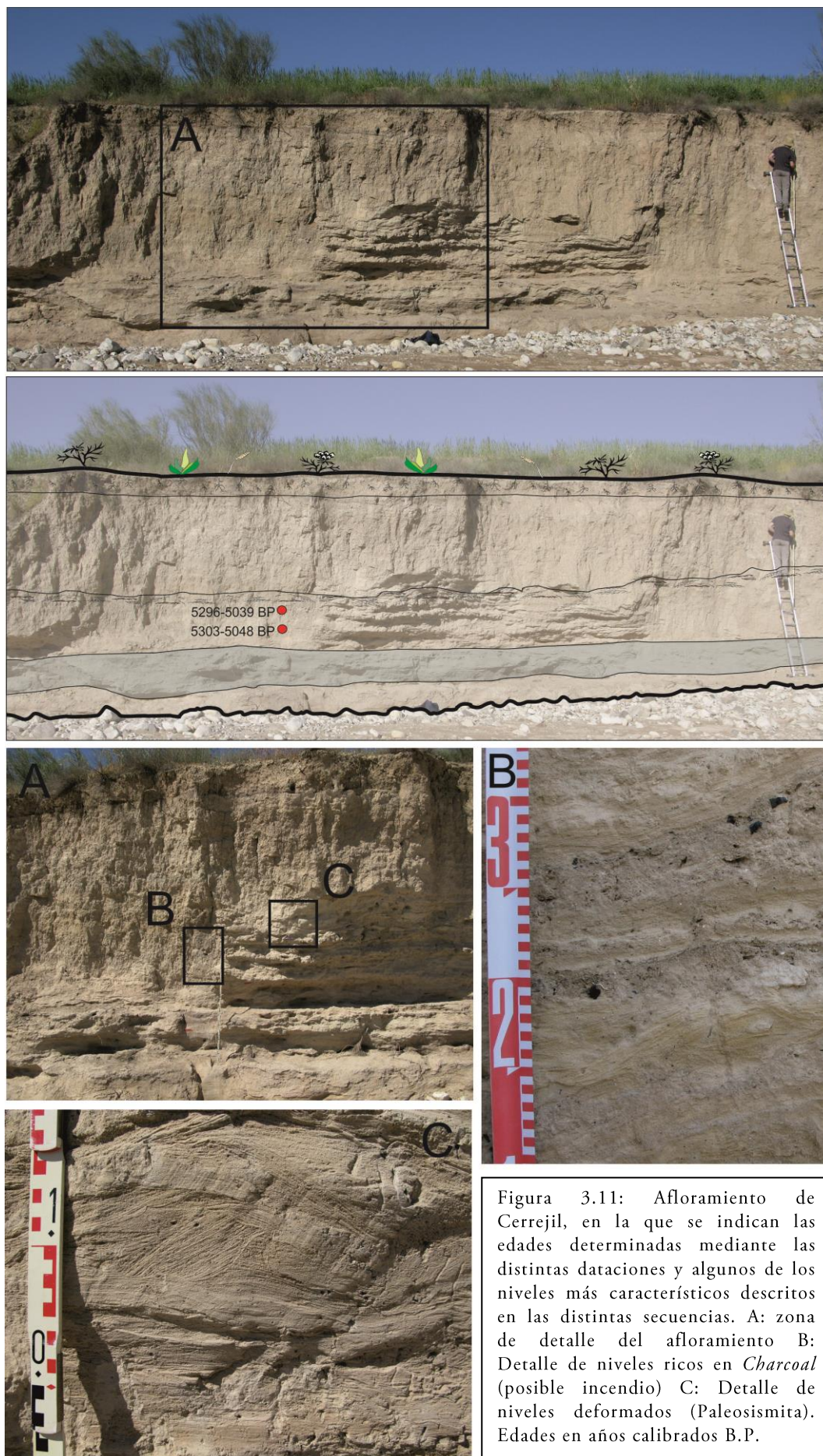


Figura 3.11: Afloramiento de Cerrejil, en la que se indican las edades determinadas mediante las distintas dataciones y algunos de los niveles más característicos descritos en las distintas secuencias. A: zona de detalle del afloramiento B: Detalle de niveles ricos en *Charcoal* (posible incendio) C: Detalle de niveles deformados (Paleosismita). Edades en años calibrados B.P.

- b) Secuencias de arenas de grano muy fino cuyo espesor oscila entre los 7 y los 3 cm. En ocasiones contienen restos vegetales. Terminan con un nivel de limos carbonatados blancos de entre 1 cm y algunos mm de espesor y de forma ocasional, con grietas de desecación. En algunas secuencias se observa bioturbación producida por pequeñas raíces.
- c) Secuencias granodecrecientes de arenas de tamaño comprendido entre medio y fino y con espesores que oscilan entre 6 y 8 cm. La base es irregular y a veces claramente erosiva. La organización interna muestra *climbing ripples* en deriva que evolucionan en la vertical a *climbing ripples* en fase. En el techo suelen presentar un nivel de limos de espesor variable, pero en general, inferior al cm. Las grietas de desecación y la bioturbación que marcan el límite superior de las secuencias, son también frecuentes.

Secuencias granodecrecientes de arena de tamaño grueso o medio que terminan con arenas de tamaño fino. Su espesor oscila entre los 15 y 8 cm. La base es irregular o erosiva. La organización interna está constituida por antidunas, laminación paralela y *ripples* de corriente. Cuando las secuencias aparecen completas presentan un término final de limos blancos de espesor milimétrico.

En el evento 41 de esta sección las estructuras sedimentarias, generalmente *ripples* de corriente y laminación paralela, presentan también una fuerte deformación atribuible a fenómenos sísmicos análogos a los descritos en las secciones anteriores (Figura 3.11 A). En los eventos 60 y 61 se aprecia una alta concentración de *charcoal* y un intenso color pardo-negro que pudiera corresponder con un nivel de acumulación de los restos de un incendio (Figura 3.11 B). En el nivel 46 se ha datado un resto de carbón vegetal que ha proporcionado una edad calibrada de 5300-5043 años cal. BP (Tabla 3.2), lo que indicaría una acumulación sincrónica con los sedimentos del perfil de Cortijo de Guadalupe.

- **Barranco del Oso**

En este punto de la margen izquierda de la Rambla Mayor, la secuencia de eventos de inundación comprende unos 3.30 m. de sedimentos visibles ((Figura 3.9; Figura 3.12). Se han reconocido 13 eventos, con dos intercalaciones de depósitos de ladera. Las texturas a lo largo de toda la sección muestran una mayor variedad en los tamaños de grano con mayor abundancia de texturas de grano grueso en comparación con las otras secciones levantadas en esta área. También abundan los restos de vegetales macerados y el carbón vegetal disperso en bastantes niveles de la sección.

- a) Secuencias granodecrecientes compuestas por arenas finas, muy finas y limos, con gránulos dispersos. Los espesores oscilan entre 20 y 30 cm. Su base es irregular y en ocasiones erosiva. Las arenas presentan un carácter aparentemente masivo, con abundante *charcoal* y bioturbación. Ocasionalmente se observa laminación difusa

de *ripples* en la parte superior de las arenas. El término final de las secuencias lo componen algunos niveles milimétricos de limos blancos.

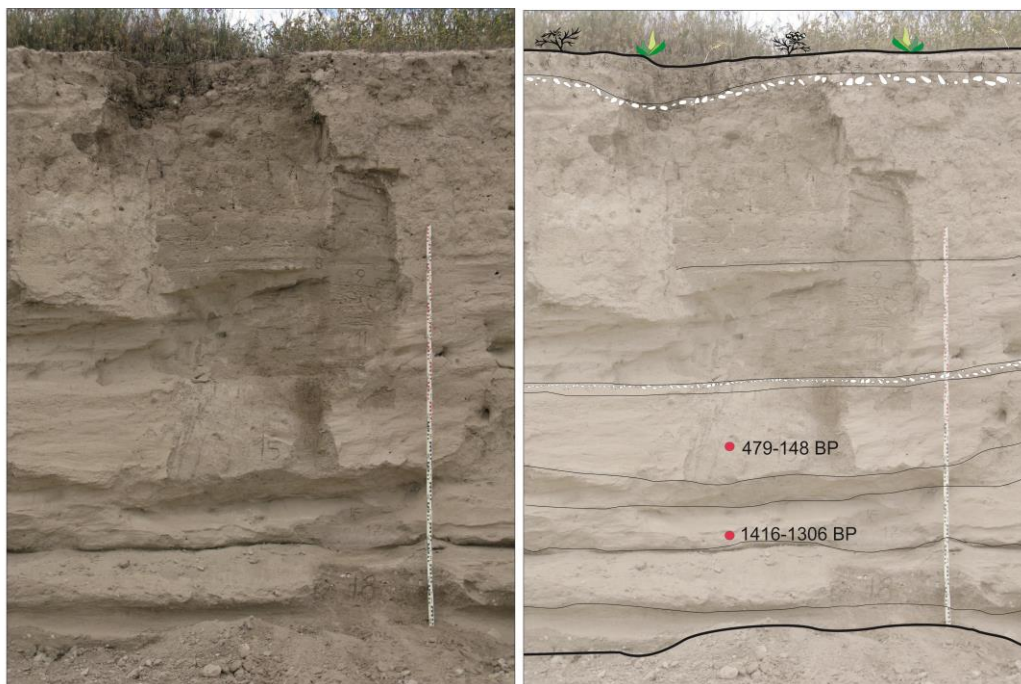


Figura 3.12: Interpretación sobre imagen del afloramiento del barranco del oso en el que se indican algunos de los estratos más característicos de las distintas secuencias, así como los niveles de los que se ha determinado su edad. La escala graduada en la imagen tiene una longitud de 2m. Edades en años calibrados B.P.

Se han diferenciado los siguientes tipos de secuencias de inundación:

- b) Secuencias granodecrecientes compuestas por arenas gruesas, finas y limos, con espesores comprendidos entre 6 y 12 cm. Base ligeramente irregular. Están constituidas por arenas con laminación paralela y un término superior de 1 a 2 cm de arenas de grano muy fino y limos, de apariencia masiva.
- c) Secuencias granodecrecientes compuestas por arenas gruesas, finas y limos, con espesor comprendidos entre 19 y 33 cm. Base irregular y/o erosiva a veces con un depósito residual (*lag*) de guijas. Las arenas presentan estratificación cruzada de surco que en la vertical evoluciona a *climbing ripples*. Tiene contienen gránulos dispersos y *charcoal*. El término superior de la secuencia está constituido por limos blancos con espesores cercanos los 2 cm.
- d) Secuencias granodecrecientes compuestas por arenas gruesas, finas y limos, con espesores comprendidos entre 8 y 12 cm. Su base es ligeramente irregular y, en ocasiones, erosiva. Están constituidas por un doblete con términos bien diferenciados. El inferior está compuesto por arenas finas con *ripples* de corriente y/o por laminación paralela. El termino superior, lo forman arenas de grano muy fino y limos en los que es habitual encontrar una notable acumulación restos vegetales macerados.

En el evento 6 de esta sección, las estructuras sedimentarias, generalmente *ripples* de corriente y laminación paralela, presentan una fuerte deformación, también originada por fenómenos sísmicos.

El evento 13 muestra una alta concentración de *charcoal* y un intenso color pardo-negro en los 3 cm inferiores. Este nivel oscuro representa una paleosuperficie con acumulación de los productos de la remoción de los restos de un incendio. El carbón vegetal acumulado en el evento 13 (OSO-2) ha proporcionado una edad calibrada de 1415-1305 años cal. BP (Tabla 3.2). Los sedimentos por encima del nivel 15 (OSO-1), y que muestra una base erosiva, se acumularía con posterioridad a una edad calibrada de 479-269 años cal. BP (AD 1471-1681; 81% probabilidad; Tabla 3.2).

- **Cerro de la Jibada**

En este punto de la margen derecha de la rambla Mayor, la secuencia de eventos de inundación comprende unos 2.30 metros de sedimentos visibles, donde se diferencian 14 eventos y varias intercalaciones de niveles de ladera (Figura 3.9; Figura 3.13). Las texturas en los eventos de inundación muestran escasas variaciones en el tamaño de grano. El *charcoal*, igual que en el resto del área considerada, es abundante.

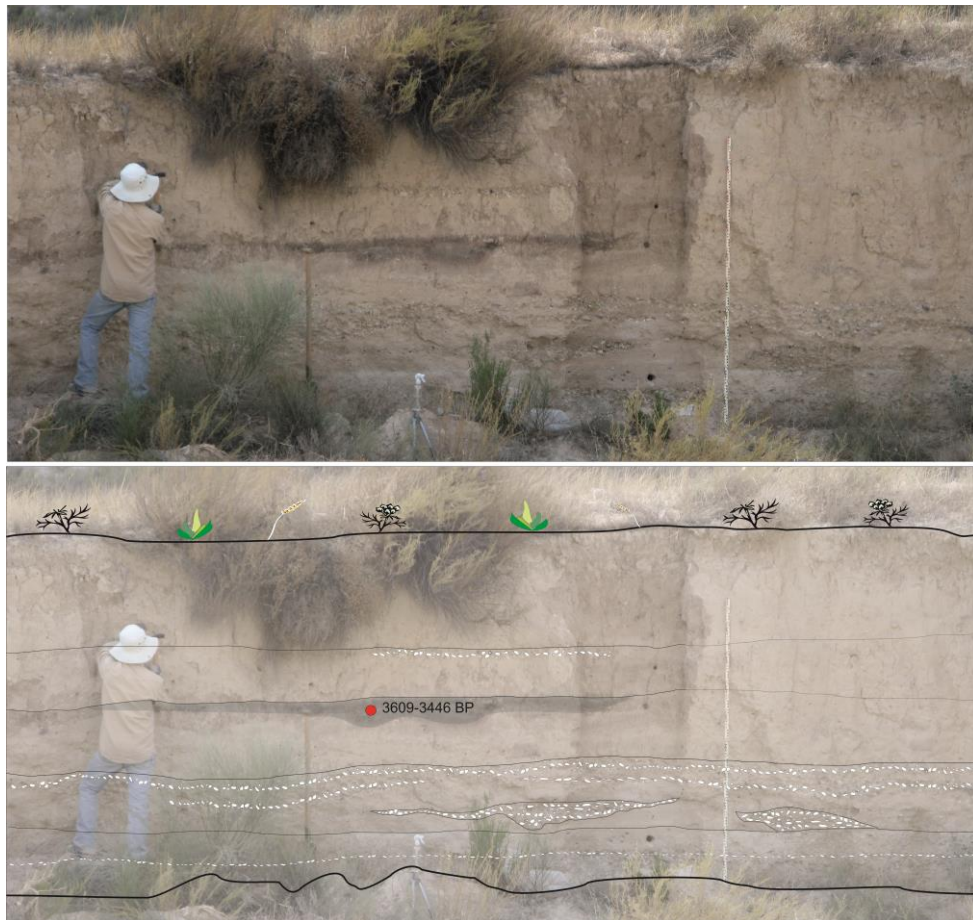


Figura 3.13: Interpretación sobre imagen del afloramiento del barranco del oso en el que se indican algunos de los estratos más característicos de las distintas secuencias, así como los niveles de los que se ha determinado su edad. Edades en años calibrados B.P.

Se han diferenciado los siguientes tipos de secuencias de inundación:

- a) Secuencias compuestas por arenas finas, muy finas y limos. Los espesores oscilan entre 7 y 14 cm. Presentan base irregular, en ocasiones erosiva. Aparentemente son masivas, ocasionalmente con gránulos y siempre con abundante *charcoal* y bioturbación producida por pequeñas raíces. El término superior de las secuencias lo constituyen niveles milimétricos de limos blancos.
- b) Secuencias granodecrescentes compuestas por arenas finas con gránulos dispersos y limos, con espesores comprendidos entre 7 y 12 cm. Base ligeramente irregular. Se diferencian dos términos, uno inferior de arenas con laminación paralela, ocasionalmente con *ripples*, y uno superior de arenas de grano muy fino y limos de espesor milimétrico.

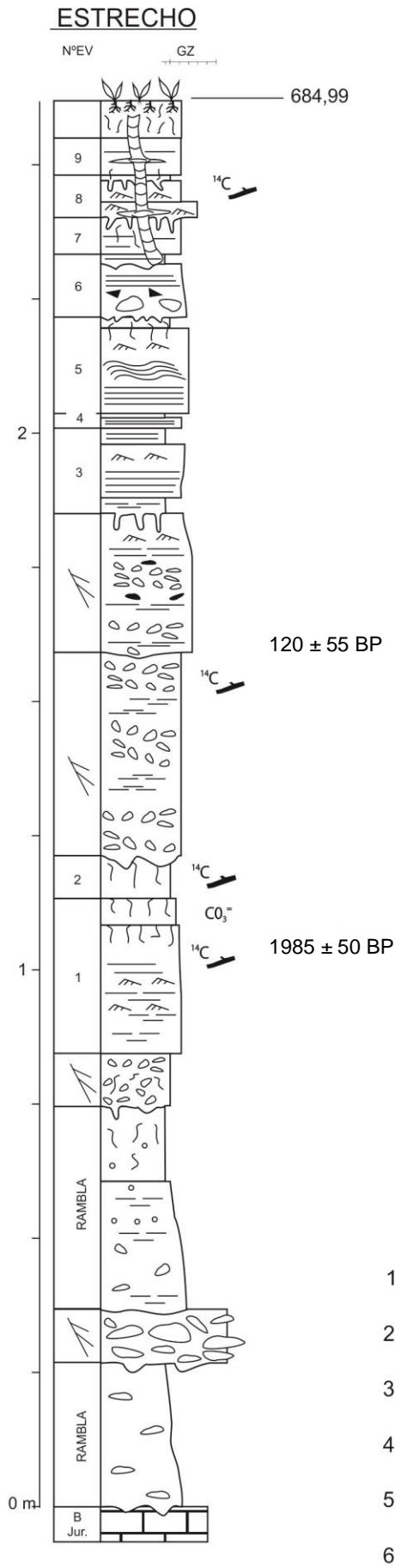
El evento 8 muestra una alta concentración de *charcoal*, fuerte bioturbación por raíces y un intenso color pardo-negro en los 3 cm inferiores que pudiera corresponder con un nivel de incendio. La datación de un carbón vegetal en este nivel oscuro ha proporcionado un edad calibrada de 3609-3446 años cal. BP (Tabla 3.2).

- **Estrecho**

Se localiza en el área denominada Estrecho, donde confluyen la Rambla Mayor con el río Alcaide (Figura 3.2). Se trata de una sección con 2.50 m de sedimentos, situada en la margen izquierda sobre las calizas del Jurásico, donde han quedado registrados un mínimo de 9 eventos de inundación en los que se intercalan 4 niveles que provienen de la ladera y 2 niveles de rambla (Figura 3.14). Las texturas en los eventos de inundación muestran escasa variación de tamaño de grano mientras que el *charcoal* es abundante como en otras áreas del entorno.

Las secuencias de inundación corresponden, en general, a los siguientes tipos:

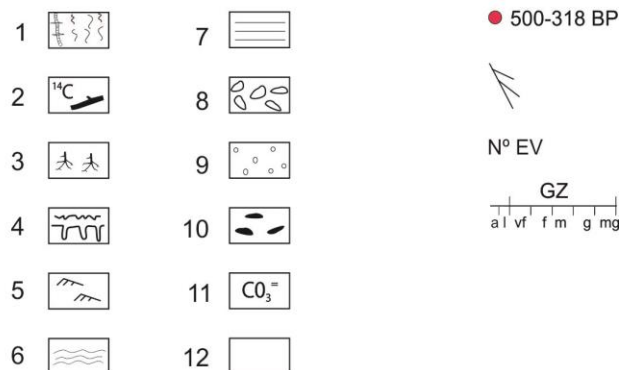
- a) Secuencias granodecrescentes de arenas de tamaño comprendido entre medio y fino y con espesores que oscilan entre 24 y 16 cm. La base es ligeramente irregular. La organización interna muestra una sucesión de laminación paralela y *ripples*. Ocasionalmente existen *climbing ripples* en fase entre ambos términos. En el techo suelen presentar un nivel de limos de espesor variable en general de 1 a 2 cm. La bioturbación que marcan el límite superior de las secuencias es frecuente.
- b) Secuencias de arenas de grano muy fino cuyo espesor oscila entre los 7 y los 10 cm. La base es irregular en ocasiones con *lag* de cantos de cuarcita y cantos blandos. Presentan laminación paralela. En el techo esta frecuentemente constituido por un nivel de 1 cm de limos se observa abundante bioturbación y huellas de pequeñas raíces.



- c) Secuencias de arenas de grano muy fino cuyo espesor oscila entre los 7 y los 10 cm. La base es irregular en ocasiones con *lag* de cantos de cuarcita y cantos blandos. Presentan laminación paralela. En el techo esta frecuentemente constituido por un nivel de 1 cm de limos se observa abundante bioturbación y huellas de pequeñas raíces.
- d) Secuencias granodecrecientes compuestas por arenas finas, muy finas y limos. Los espesores oscilan entre 5 y 15 cm. Presentan base suavemente irregular. Las arenas presentan un carácter aparentemente masivo, con abundante *charcoal*, acumulación de restos vegetales macerados y bioturbación. El término superior de las secuencias viene definido por abundante bioturbación y niveles milimétricos de limos. En algunas secuencias se observa bioturbación producida por pequeñas raíces.

Figura 3.14: Columna estratigráfica del afloramiento del estrecho donde se indica la edad de los estratos en los que se han adquirido muestras de *charcoal*. Edades en años calibrados B.P.

LEYENDA



- a) Secuencias granodecrecientes compuestas por arenas finas, muy finas y limos, con gránulos dispersos. Los espesores oscilan entre 20 y 30 cm. Presentan base irregular, en ocasiones erosiva y a veces con depósito residual (*lag*) de guijas. Las arenas presentan un carácter aparentemente masivo, con abundante *charcoal*, acumulación de restos vegetales macerados y bioturbación. Ocasionalmente se observa laminación difusa de *ripples*. El término superior de las secuencias viene definido por niveles milimétricos de limos blancos.
- b) Secuencia de arenas finas y microconglomerados. El término inferior de la secuencia presenta un carácter granocreciente desde arenas de grano fino a microconglomerados de gránulos. El término superior está formado por arenas de grano fino. El espesor es de 24 cm. Presenta base irregular y laminación paralela.
- c) Secuencias granodecrecientes compuestas por arenas gruesas, finas y limos, con espesores comprendidos entre 6 y 12 cm. Base ligeramente irregular. Están constituidas por arenas con laminación paralela, ocasionalmente se *ripples*, y un término superior de 1 a 2 cm de arenas de grano muy fino y limos.

En este perfil se han datado tres muestras de carbón vegetal, la basal (nivel 14) ha proporcionado una edad calibrada de 2302-2000 años cal. BP (92.9% de probabilidad; 360-156BC; Tabla 3.2). Las muestras datadas en la parte intermedia y superior del perfil (niveles 14 y 11) presentan una edad calibrada muy similar entre 2290-1988 años cal. BP (94% de probabilidad entre 204-40BC; Tabla 3.2).

3.4. Discusión sobre la cronología de los periodos de agradación e incisión Holocena

El registro morfosedimentario de la cuenca alta del Guadalentín permite completar la historia de los principales periodos de producción de sedimento que generan agradación en los fondos de valle, así como las etapas favorables a la incisión de la red de drenaje. Las principales causas desencadenantes de estos episodios de agradación e incisión pueden ser climáticas, antrópicas y tectónicas, o una combinación de las mismas. La cuenca alta del Guadalentín se ha dividido en dos sectores denominados Sector de Guadalupe (zona de confluencia de la Rambla Mayor y río Alcaide), y sector de María (cabecera de la cuenca), que presentan una evolución morfosedimentaria diferenciada. En el sector de María se caracteriza por una escasa conectividad aluvial con el sector de Guadalupe entre 9000 y 3000 años cal BP, con dominio de las secuencias de agradación o de incisión local-relleno sobre el fondo de valle. Con posterioridad a

los 3000 años cal BP, se desarrolla una fuerte incisión, seguida de al menos tres ciclos de incisión-relleno parcial que permiten el desarrollo de tres terrazas fluviales: +6 m, + 5-4 y +2-3 m. En el sector de Guadalupe, la presencia de niveles escalonados y aterrazados en glaciares y terrazas indican una buena conexión del río Caramel-Rambla Mayor con los cambios de nivel de base producidos en la cuenca baja del Guadalentín durante el Holoceno. Los niveles morfosedimentarios aparecen escalonados en el modelado como respuesta a una disección discontinua del nivel de base fluvial y el desarrollo de diferentes episodios de incisión-relleno (ciclos de *cut-and-fill*) durante el Holoceno (Figura 3.16).

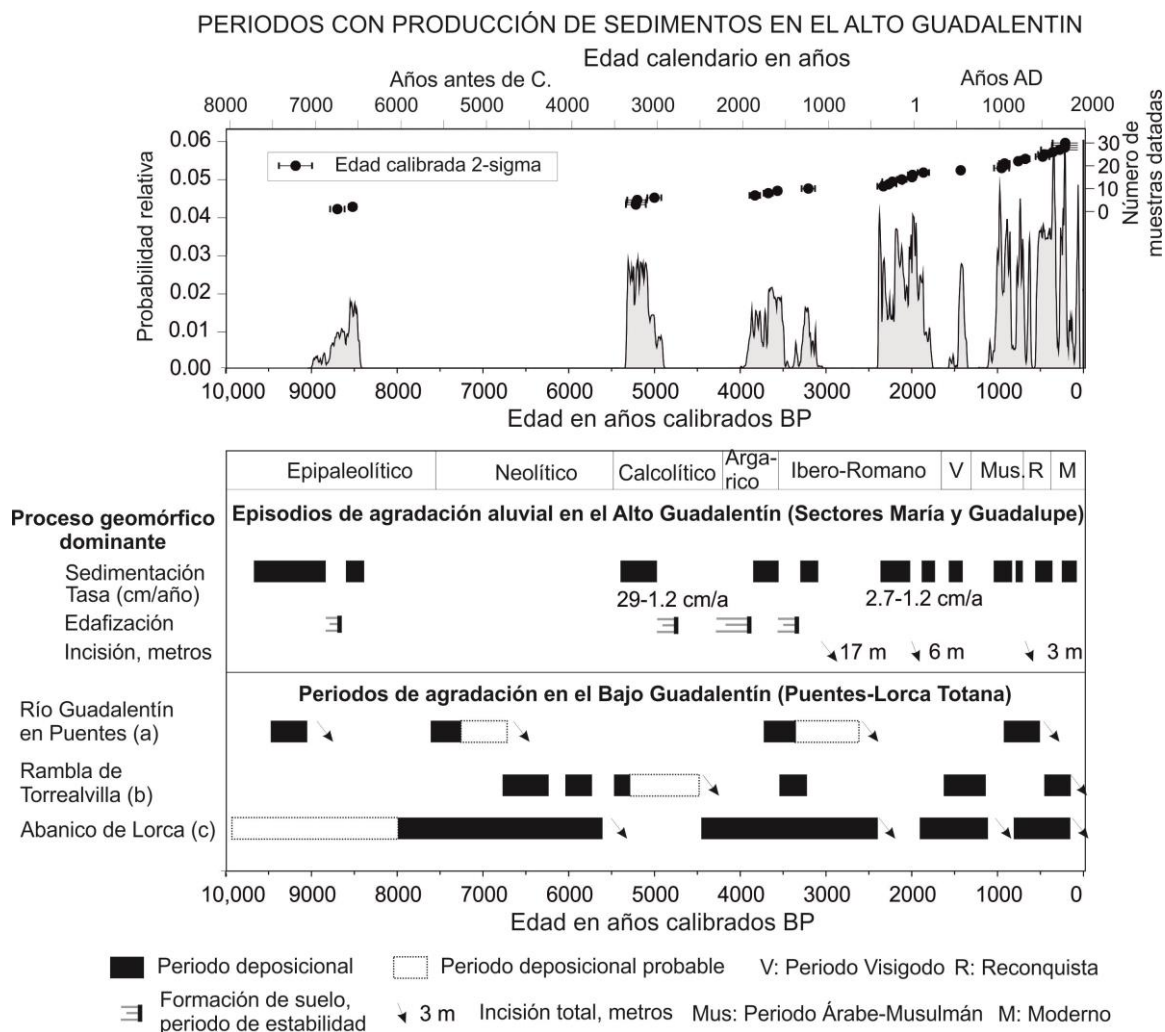


Figura 3.16: Periodos de producción/ erosión de sedimentos en la cuenca de Valdeinfierno, en base a las tendencias sedimentarias y erosivas descritas en la cuenca y las edades determinadas en los afloramientos, comparado con la curva de probabilidad relativa del programa OXCAL. Arriba; Abajo : Distribución temporal de los principales periodos de agradación, edafización e incisión, con indicación de las tasas de la actividad . Los periodos de agradación del río Guadalentín en Puentes y en la Rambla Torrealvilla corresponde a Baartman et al. (2011), y las correspondientes al abanico de Lorca, a Silva et al. (2008).

Las edades obtenidas en los depósitos aluviales del sector de María indican que la sedimentación estaba activa desde al menos el Holoceno Temprano, al datarse un nivel de suelo incipiente con una edad de 8976-8558 años cal. BP (Figura 3.16). Este suelo se desarrolla sobre secuencias medias-distales de un abanico aluvial (arena y limos con niveles de arena gruesa y gravilla).

Sobre este suelo se acumulan limos y arena fina que culminan en un suelo oscuro de carácter vértico, con buen desarrollo lateral, y que indican condiciones palustres o de drenaje deficiente en el fondo del valle durante este periodo. En este relleno se produce una primera fase de incisión con formación de canales que presentan una base de gravas que incluyen cantos blandos y que indican una actividad torrencial. Sobre la base de gravas se depositan arenas y limos que terminan por cubrir el relleno aluvial más antiguo (sedimentación en *onlap* lateral; Figura 3.16). La edad del relleno es de 8582-8430 años cal. BP, lo que indica una continuidad temporal de los procesos de relleno durante el Holoceno temprano. Estos episodios de agradación no han podido datarse en el sector de Guadalupe, aunque es muy posible que correspondan al nivel 6 de terraza-glacis en base a su posición geomorfológica respecto a otros niveles datados en este sector.

Después de esta primera fase aluvial de inicios del Holoceno es muy probable que exista una interrupción en la actividad morfogenéticas aluvial hasta 5500 años cal BP, al menos no se han encontrado evidencias sedimentarias. La reactivación aluvial en el Holoceno medio se manifiesta tanto en el sector de María como en Guadalupe, aunque muestran ambientes morfosedimentarios diferentes. En el sector de María, continúa la agradación del relleno aluvial con la acumulación de arenas y limos, y algunos niveles de gravas y gravillas, culminando con formación de dos paleosuelos de carácter vértico que indican condiciones de humedad y encharcamiento estacional, y vegetación en el fondo del valle en un ambiente semi-endorreico (palustre). Los ácidos húmicos de uno de estos paleosuelos han sido datados en 4875-4690 años cal BP (Figura 3.16).

En contraste, en el sector de Guadalupe se produce una fuerte actividad erosiva con descenso importante del nivel de base que disecta los niveles de glacis aluviales anteriores, seguida de una importante actividad morfosedimentaria que acumula secuencias fluviales y de abanicos aluviales con espesores de al menos 6 m, constituyendo el nivel de agradación aluvial más extenso de este sector. En la zona de Guadalupe se han datado sedimentos correspondientes a esta fase en dos de los perfiles de mayor espesor (ca. 6 m), concretamente en los perfiles de Cortijo de Guadalupe y Cerrejil. El inicio de la sedimentación se produciría entre unos 5300 y 5000 años cal BP, y terminaría entre 4980 y 4825 años cal BP. Por tanto, se trata de depósito que se acumularía de forma rápida en un periodo que podría oscilar entre 20 años y 475 años, teniendo en cuenta el rango más corto y más largo de edad resultantes de la probabilidad 2-sigma de las dataciones de radiocarbono. Por tanto, las tasas medias de acumulación de este depósito están comprendidas entre 29 cm/año y 1.2 cm/año que, incluso en el rango inferior, se pueden considerar como elevadas. La alta producción de sedimentos asociada a este episodio aluvial podría estar ocasionada por varios factores. En primer lugar, el impacto regional de esta fase apunta a causas climáticas, con aridificación del clima que permitiera el descenso de la cobertura vegetal (desprotección del suelo) y el incremento de los eventos de lluvias intensas. Las facies aluviales estudiadas apuntan a la existencia de múltiples eventos, que ocurrirían en periodos cortos de tiempo, dentro de un contexto de condiciones climáticas semiáridas, no muy diferente a la actual. Otro factor a tener en cuenta es el papel del hombre que comienza a tener

importancia en el tránsito del Neolítico al Calcolítico, con diversos asentamientos conocidos en la zona de estudio (e.g. Cueva Haizea; Ocharan Ibarra, 2010). Sin embargo, aunque existen algunos niveles de incendio en la secuencia de Cortijo de Guadalupe y Cerrejil, no se puede concluir que la actividad antrópica fuera determinante en la generación de este episodio de intensa actividad aluvial. Finalmente, el reconocimiento de estructuras de deformación interpretadas como un nivel de paleosismos, y que a partir de tres dataciones de radiocarbono podemos concretar que ocurrió entre 5000 y 5300 años cal BP. Esta actividad neotectónica durante el Holoceno medio se ha estudiado en la región, y existen evidencias de deformación de los depósitos aluviales, en concreto que afectan a un suelo fechado en 4100-4500 años cal. BP (Calmel-Avila, 2002; Silva et al., 2008) y a depósitos de inundación del río Segura que Sánchez-Gómez et al. (2011) interpretan como un paleoterremoto ocurrido entre 4700 y 2100 BC.

Después de esta fase de actividad, se produce un breve periodo de interrupción de la sedimentación con formación de un suelo durante el Calcolítico e inicios del Bronce, que aparece desarrollado sobre la Unidad G (Cortijo de Diego) en el sector de María, y que ha sido datado en 3888-3698 años cal BP. A nivel regional, existen evidencias del desarrollo de un suelo calcolítico en el abanico del Lorca que ha sido datado en 4400-4200 años cal. BP, y que está asociado a una fase de estabilización aluvial continua hasta el Bronce tardío (~3100 años cal. BP; Figura 3.16; Silva et al., 2008).

La segunda fase de agradación importante en el relleno aluvial del sector de María comienza con anterioridad a 3000-3300 años cal. BP. En un primer estadio, esta fase tiene un carácter erosivo (segunda fase erosiva principal de María), y está asociado a flujos torrenciales que rellenan incisiones canaliformes de gravas, y que culminan con niveles de arenas y limos formando una llanura aluvial arenoso-lutítica (unidad H del perfil Cortijo de Diego, sector de María). Existen evidencias en la parte superior de este relleno que permiten interpretar un inicio de la actividad fluvial de aporte longitudinal desde la cabecera del valle, que marcan el inicio de la conectividad con el sector de Guadalupe (Figura 3.16).

Los cambios morfo-sedimentarios generados por esta conectividad originan la fase de erosión principal en el relleno aluvial de María con una incisión de más de 15 m que se traslada aguas arriba desde el estrecho rocoso del sector del Cortijo de las Juntas. Por tanto, la incisión del relleno aluvial ocurrida durante el primer milenio a. C. constituye el inicio de los cambios morfo-sedimentarios más notables acontecidos durante el Holoceno en el sector de María. La incisión de ca. 15m tendría lugar en algún momento entre el final del relleno aluvial datado en 3000 años cal BP y el inicio de la sedimentación en la primera terraza (perfil las Juntas) que rellena la incisión datado en 2350-2200 años cal. BP. De acuerdo a estas evidencias cronológicas podemos estimar con una tasa media de incisión de, al menos, 2.3 cm/año.

Esta fase de fuerte incisión es sincrónica con una fase de acumulación en el Bajo Guadalentín (Lorca-Totana) donde se depositan hasta 11 m de sedimentos torrenciales compuestas por bloques y material heterométrico que representa un periodo de grandes inundaciones cuyo

techo se ha datado entre 2800-2400 años cal. BP (Figura 3.16; Calmel-Avila, 2002). En este caso, el carácter endorreico de la Cuenca del Guadalentín habría favorecido que la erosión generada durante la incisión en la cabecera de la cuenca se acumulara en la parte baja de la Cuenca, aguas abajo de Lorca. Sin embargo, determinar la causa o causas que conducen a esta incisión resulta complicado y altamente especulativo. Por un lado, los depósitos fluvio-torrenciales descritos en la parte baja del Guadalentín por Calmel-Avila (2002) indican una causa climática que desencadena el aumento de los eventos extremos de lluvia en la cabecera del Guadalentín, coincidente con el registro de grandes inundaciones en otros ríos Mediterráneos durante el periodo 2850-2400 años cal BP (Benito et al., 2008). La mayor erosión en los fondos de valle se podría haber acelerado por la presencia humana, ya que existen vestigios de numerosos asentamientos de la Edad del Cobre a lo largo del curso alto del Caramel (Martínez López y Muñoz Muñoz, 1999). Sin embargo, no existen evidencias directas físicas o documentales que demuestren el impacto de esta población, aunque evidentemente subsistían de actividades agrícolas y ganaderas principalmente en el fondo de valle y las laderas próximas.

Durante el Holoceno tardío (últimos 2300 años) se pueden identificar sucesivos ciclos de incisión-relleno que generan tres niveles de terrazas aluviales escalonadas e insertadas unas en otras (+6-5 m, +5-4 m, +3-2 m), y a su vez adosadas con el relleno aluvial holoceno más antiguo (Figura 3.16). El primero ciclo morfo-sedimentario comprende el periodo 2350-1900 años cal. BP y condujo al desarrollo de la primera terraza fluvial (+6-5 m) encajada en el relleno de valle principal en el sector de María. En el perfil de las Juntas se ha datado la base de la terraza en 2350-2200 años cal BP, mientras que el techo se ha datado en 1993-1887 años cal BP, lo que permite estimar una tasas de deposición media entre 2.75 cm/año y 1.25 cm/año. Esta terraza presenta una buena continuidad a lo largo del valle incidido en el relleno holoceno, tanto en el sector de María (Perfil de las Juntas) como en el sector de Guadalupe (Perfil Vado de la Fuensanta y Perfil Estrecho). En ambos casos está constituido por secuencias de arenas finas y limos en dobletes bien diferenciados, y que indican una sedimentación rápida y en condiciones de baja energía. Hacia techo se identifican periodos de interrupción en la sedimentación fluvial que permiten la intercalación de depósitos de ladera y la instalación de vegetación que genera bioturbación y huellas de raíces. Igualmente, a techo se identifican niveles de gravas y arenas gruesas indicativas de facies de mayor energía, y que pueden ser origen del incremento de la actividad torrencial al final del periodo (2000 años cal BP). En el perfil de Cortijo de Juntas de abajo, las dataciones realizadas a techo del Perfil de las Juntas (1993-1887 años cal BP; terraza +6-5 m) y en la base la terraza adosada (+5-4 m) descrita en el perfil de Balcones (1884-1728 años cal. BP) permite acotar temporalmente la incisión de ~6 m que inicia el segundo ciclo de incisión-relleno a el periodo comprendido entre 60AD y 200 AD. Por tanto, la tasa de incisión sería de 4.3 cm/año, lo que representa las mayores tasas de incisión registradas (Figura 3.16).

En la Depresión del Guadalentín, se ha descrito un momento de incisión rápido que afecta al sector central de la Rambla de Librilla, donde alcanza los 15-16 m de profundidad, y que está en relación con la captura del Guadalentín por el antiguo río Sangonera, que permitió la salida

de la red del drenaje del Guadalentín hacia el Mediterráneo (Calmel-Avila, 2002). Esta incisión afecta igualmente al abanico de Lorca durante o poco después del Periodo Romano (Silva et al., 2008). Otra posibilidad es que esta gran incisión de 16 m que afecta a la Rambla de Librilla sea equivalente a la profunda incisión que afecta al relleno aluvial del sector de María, aunque la cronología descrita indica que en María la incisión se produciría durante el periodo Ibérico, mientras que en Lorca corresponde al final del Periodo Romano (Figura 3.16).

La segunda terraza aluvial (+5-4 m) del Holoceno tardío tiene un carácter poligenético y responde a pulsos hidro-sedimentarios de diferente edad que responden a facies de desbordamiento del cauce durante avenidas. Por ejemplo, en el perfil de Balcones los sedimentos fluviales de su base presentan una edad de 1884-1728 años cal BP, mientras que los sedimentos suprayacentes muestran una edad de entre 741-662 años cal BP. En el sector de Guadalupe, existen evidencias de aportes fluviales datados en 1416-1306 años cal BP (AD 534-644). En la cuenca baja del Guadalentín en Lorca, Silva et al. (2008) describen una terraza aluvial similar (+5-6 m) de 4-5 m de espesor, que asocian un periodo de agradación comprendido entre el Periodo Romano (~1700-1900 años cal. BP) y inicios del Periodo Musulmán (~930-1000 años cal. BP; Figura 3.16).

La tercera terraza escalonada (+2-3 m) no corresponde en sentido estricto a un ciclo de incisión-relleno, sino que se trata de depósitos de inundación acumulados en zonas de remanso (*slackwater-flood deposits*) que se adosan, y en ocasiones se superponen, a los niveles terrazas anteriores. Estos depósitos están constituidos por arenas finas, muy finas y limos con *ripples* de corriente y laminación paralela, y a techo de las secuencias muestran niveles de limo o arcilla con grietas de desecación que marcan el fin de la secuencia. En el sector de María estos sedimentos se han descrito en el perfil de Morro, y en el sector de Guadalupe aparecen bien desarrollados entorno al Estrecho, donde confluyen la Rambla Mayor con el río Alcaide, y que han permitido reconstruir la secuencia de paleoavenidas para el último milenio (Benito et al., 2010). Las dataciones de esta tercera terraza (+2-3 m) muestran edades en su base comprendidas entre finales de la Anomalía Climática Medieval (~1000-700 años cal BP) y la actualidad (e.g. Perfil El Morro).

En la zona de confluencia entre la Rambla Mayor y el río Caramel, aguas arriba del estrecho, la estratigrafía de estos depósitos de paleoavenida permite identificar cinco episodios principales de inundación (Benito et al., 2010): (1) 950-1200 cal AD, (2) AD 1648-1672, (3) AD 1769-1802, (4) AD 1830-1840 (5) AD 1877-1900. La fase 1 coincide con la Anomalía Climática Medieval, aunque su relación con condiciones más frías o cálidas es incierta. Las fases siguientes se enmarcan en la Pequeña Edad del Hielo. Las Fases 4 y 5 están asociadas a avenidas con elevada energía, tal y como se deduce de las estructuras sedimentarias, y coinciden con importantes cambios de uso de suelo que ocurrieron desde finales del Siglo XVIII, y consecuencia del incremento demográfico en la cuenca de estudio (Lentisco Puche, 1996; García Latorre, 1998). La presión demográfica, principalmente durante el siglo XIX) produjo un incremento en la deforestación, y el cultivo de tierras marginales (Lentisco Puche, 1996; Sánchez Picón, 1996). Estos cambios de uso y la deforestación han podido magnificar la

respuesta hidrológica y las inundaciones ocurridas durante la segunda mitad del Siglo XIX, así como la erosión acelerada y los volúmenes de sedimento que llegaron a colmatar en pocos años la mayor parte del vaso del embalse de Valdeinfierno.

3.5. Conclusiones

El estudio de los rellenos aluviales holocenos en la cuenca alta del río Guadalentín permite determinar los principales periodos de producción de sedimento en la cuenca y sus posibles causas climáticas, tectónicas y/o de cambio ambiental.

Desde el punto de vista morfo-sedimentario se diferencian dos sectores geográficos. La cuenca alta del río Caramel (Sector de María [1]) se caracteriza por una historia aluvial marcada por la escasa conectividad de esta parte de la cuenca con los tramos inferiores, y que permiten la agradación aluvial del fondo de valle desde inicios del Holoceno hasta hace 3000 años, momento en el que se produce un cambio en la morfogénesis aluvial con predominio de los ciclos de incisión relleno. La zona de confluencia y valles adyacentes de la Rambla Mayor con el río Caramel (Sector de Guadalupe [2]). Se caracteriza por el encajamiento y escalonamiento en el paisaje de los niveles aluviales holocenos, indicando un progresivo del nivel de base como consecuencia de su conexión con los tramos inferiores del río Guadalentín.

Este estudio muestra que las fases de agradación se producen como consecuencia del incremento en la producción de sedimento, y se concentran en determinados periodos de tiempo (Holoceno temprano-medio; 9000 y 8500 ; 5300-4800 ; 4000-3000 años cal BP y final del Periodo Romano) desarrollando extensos rellenos aluviales con elevada producción de sedimento desde las cuencas secundarias (formación de abanicos aluviales) con tasas de agradación elevadas (entre 1.2 y 29 cm/año).

La elevada frecuencia de niveles de carbón vegetal es indicativa de una elevada frecuencia de incendios que pueden tener un origen natural, como consecuencia de una tendencia a la aridez hace unos 5000 años cal BP, o de origen antrópico asociado al incremento de los asentamientos durante el final del Neolítico. Algunos de los niveles presentan deformaciones debidas a paleosismos, aunque no se puede establecer su relación con el incremento en la producción de sedimento. El periodo entre 4000 y 3000 años cal BP representa un momento de producción sedimentaria menor y la fase final de la agradación del relleno holoceno del sector de María.

Los últimos 3000 años muestran importantes cambios morfogenéticos, dominados por los ciclos de incisión-agradación. En el sector de María, la incisión principal del relleno aluvial del Holoceno temprano se presenta entre 3000 y 2350 años cal BP, con una tasa media de incisión \geq a 1.7 cm/año. Su correspondencia con facies fluvio-torrenciales en la depresión del Guadalentín en Lorca indica un origen climático debido al incremento de los eventos extremos.

A final del Periodo Romano se han identificado dos ciclos de erosión-acumulación abruptos que indica una posible crisis climática, con aumento de la aridez, y quizás el incremento de los eventos extremos (tasas media de acumulación de entre 2.75 cm/ año y 1.25 cm/año). Los cambios abruptos también han sido detectados en el primer milenio después de Cristo (incisión ~ 6 m del nivel de +5-6 m en apenas unas décadas).

Desde la época musulmana (AD 710) hasta la Edad Media se registran episodios menores de agradación que conforman un nivel aluvial de carácter poligenético, y que alternan con periodos largos (multidecenales) de estabilidad morfogenética.

En el periodo histórico se identifican diferentes momentos con aumento de los eventos de avenidas que responden a condiciones climáticas variables de la Pequeña Edad del Hielo, pero que se incrementan en magnitud y frecuencia como consecuencia de los cambios demográficos y de uso del suelo ocurridos en la cuenca de estudio desde finales del Siglo XVIII y que se acentúan durante el siglo XIX. Los eventos con magnitud creciente desde el siglo XVIII son responsables de sedimentos finos de paleoavenidas (*Slackwater flood deposits*) sobre los niveles del Holoceno tardío, y de la reactivación en la producción de sedimento observada particularmente en la segunda mitad del Siglo XIX, que se aborda en el sexto capítulo de esta Tesis Doctoral.

Capítulo 4: Respuesta hidrológica a los cambios en el uso del suelo y eventos extremos en periodo instrumental

Introducción

El análisis del comportamiento hidrológico y de la producción de sedimentos en la cuenca alta del Guadalentín se ha realizado mediante el modelo hidrológico distribuido TETIS y su módulo de sedimentos TETIS-SED, que consiste en un bloque de simulación de la erosión del suelo y de su posterior transporte a lo largo de la red fluvial. Para la correcta comprensión del capítulo es importante diferenciar algunos conceptos relacionados con la pérdida de suelo. El primero es la erosión, que se refiere a la erosión del suelo in situ, o mejor dicho la tasa de rebajamiento de la superficie del suelo por erosión (mm/año). El segundo es la producción de sedimento, que se refiere a la cantidad de sedimento que sale de una cuenca (t/Ha*año). Por último, la tasa de entrega de sedimento se define como la relación entre la producción (salida) y la tasa de erosión cuyo valor se encuentra entre 0 y 1, tal que en una cuenca desconectada donde no existe salida del material erosionado, el coeficiente es 0, y en una cuenca totalmente conectada donde todo lo que se erosiona en un evento sale, el coeficiente es 1.

Los objetivos concretos de este capítulo son:

Calibrar y validar un modelo hidrológico distribuido (considerando la producción y transporte de sedimento), mediante los datos disponibles en una cuenca no aforada.

Determinar el funcionamiento hidrológico y sedimentario de la cuenca a lo largo de todo el periodo instrumental, considerando las variaciones en los usos del suelo.

Analizar la influencia de los usos del suelo sobre los procesos acontecidos en la cuenca, mediante el planteamiento de escenarios de usos del suelo alternativos.

4.1. Antecedentes en el estudio de la distribución espacial y temporal de la erosión y producción de sedimento en la cuenca del río Guadalentín

La determinación del transporte de sedimento dentro de una cuenca hidrológica está limitada por la cantidad y calidad de los datos instrumentales disponibles (Beven, 1993; Bloschl y Sivapalan, 1995; Beven, 2001). Distintos autores plantean como alternativa para el cálculo de erosión y la producción de sedimento la determinación de los volúmenes de los depósitos sólidos retenidos en presas e infraestructuras hidráulicas menores como diques de retención de sedimento (Avedaño, 1997; Van Rompaey et al., 2001; Verstraeten y Poesen, 2001; Romero-Díaz et al., 2007; Boix-Fayos et al., 2008). Este planteamiento permite la obtención de datos de transporte en cuencas no aforadas y sin instrumentación específica, aunque limita el análisis de la sedimentación a los volúmenes totales y no al transporte generado por eventos individuales de precipitación-escorrentía.

Otro aspecto a considerar es la representatividad del volumen de sedimento acumulado en presas y embalses respecto a las tasas de erosión en una localización puntual o sector (sub-cuenca) del territorio. Dicho de otro modo, se hace necesario desarrollar herramientas y modelos paramétricos que permitan simular convenientemente la erosión en ladera, la producción de sedimento en cualquier punto de la red de drenaje, y las tasas de salida en la cuenca. Las tasas de sedimento que se exportan, y en nuestro caso se acumulan en presas y embalses, deben de considerar la conectividad del sistema fluvial y de los procesos que actúan, desde la pérdida por erosión en la ladera hasta la producción de sedimento registrada a la salida, en lo que Walling (1983) describió como *The sediment delivery problem*. Este aspecto resulta crítico cuando se intenta la traslación de los volúmenes acumulados en los vasos de presas a tasas medias de denudación en la cuenca, manifestándose claramente en la comparación de la erosión obtenida por diferentes métodos y referida a los mismos periodos de medida (Romero-Díaz et al., 2007).

La implementación de un modelo distribuido como el TETIS conjuntamente con su módulo TETIS-SED (Bussi et al., 2014), permite abordar estas incertidumbres en tanto en cuanto se simulan las condiciones de generación de escorrentía, la erosión de sedimento en ladera y la producción de sedimento a lo largo de los cauces, determinando su conectividad en función de su pendiente y geometría, utilizando como referencia para el cálculo los datos de precipitación y escorrentía. Este modelo hidro-sedimentario distribuido aumenta su robustez con una apropiada calibración y validación basada en datos instrumentales y *proxies* sedimentarios, recopilados a nivel de evento y de periodo de simulación, se han utilizado a efectos de la calibración y validación del modelo sobre la cuenca de estudio.

4.1.1. Tasas producción y transporte de sedimentos en el contexto regional

La cuenca del río Guadalentín ha estado sujeta a importantes procesos de erosión acelerada, siendo objeto de distintos estudios de erosión del suelo (García-Ruiz y López Bermúdez, 2009). Por este motivo esta área ha sido estudiada mediante distintas metodologías a lo largo del tiempo. En diversos estudios se describe una amplia variedad de tasas de pérdida de suelos, en parte debido a las diferentes técnicas y métodos de medición de la erosión, periodos de registro y usos del suelo de la zona estudiada (García-Ruiz y López Bermúdez, 2009). En un estudio reciente sobre la región de Murcia Romero-Díaz et al. (2011) obtiene para nuestra zona valores de erosión inferiores a 2 t/Ha*año, a excepción de las áreas de erosión acelerada (e.g. cárcavas, zonas con *piping*). En zonas de cárcavas los valores pueden elevarse a más de 50 t/Ha*año e incluso superar las 146 t/Ha*año (Romero-Díaz et al., 2010; Romero-Díaz et al., 2011). Sin embargo, las estimaciones de la erosión pueden variar la técnica utilizada (Figura 4.1), obteniéndose mayores valores de erosión en las técnicas basadas en la medida del rebajamiento superficial del suelo (medidas topográficas, transectos y perfiles), mientras que las menores tasas se registran en las técnicas basadas en el volumen de sedimento acumulado en tanques y reservorios o en aforos de cuencas y parcelas.

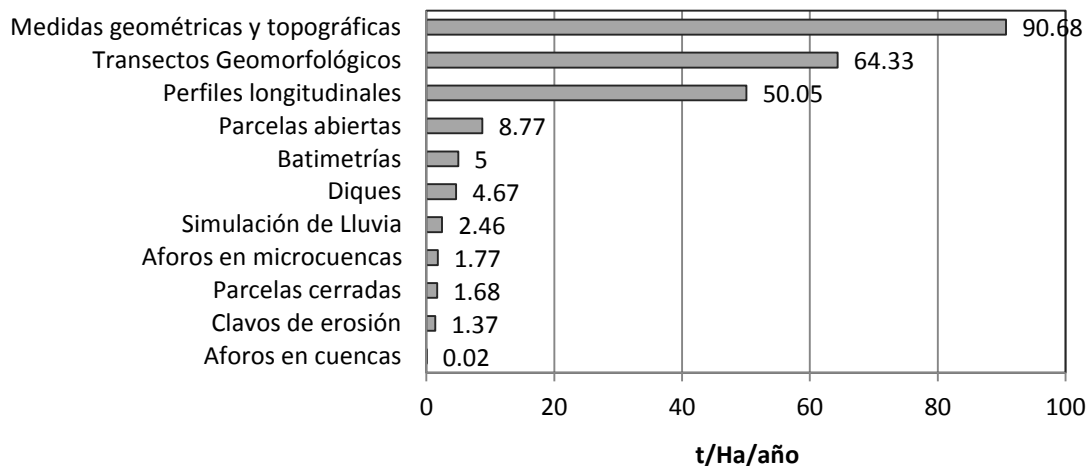


Figura 4.1: Figura modificada de Romero-Díaz et al. (2011), en la que se define la tasa de erosión media medida en distintos puntos de la región de Murcia, mediante distintas técnicas de análisis de la erosión.

Otros trabajos con tasas erosión medidas en zonas cercanas al área de estudio muestran igualmente una gran variabilidad. Estas tasas son elevadas con hasta 87 t/Ha*año en parcelas experimentales emplazadas en zonas de cultivo abandonadas, obtenidas por comparación de superficies entre dos tomas de datos topográficos utilizando GPS diferencial (Lesschen et al., 2008). En zonas de cárcavas y *piping* en cultivos de almendros las tasas de erosión determinadas mediante medidas de campo varían entre 36.6 y 37.6 t/Ha*año (Poesen et al., 2002). Las tasas obtenidas con simulador de lluvia para diferentes tipos de suelo e intensidad de lluvia simulada son más bajas y varían entre 0.09 y 14,36 t/Ha*año (Morgan, 2001; Romero-Díaz et al., 2011). En transectos, los valores de erosión obtenidos en margas se sitúan entre las 71 y 93 t/Ha*año y

en conglomerados entre 17 y 40 t/Ha*año (Chaparro y Esteve, 1995), tasas similares a las obtenidas por Romero-Díaz et al. (2010), quienes indican valores de 105 t/Ha*año, 63 t/Ha*año y 29 t/Ha*año en margas, conglomerados y esquistos respectivamente. En zonas deforestadas con presencia de cárcavas, las tasas de erosión pueden aumentar entre 1 y 2 veces el orden de magnitud de la erosión (Wijdenes et al., 2000).

Una de las técnicas de medida de la erosión más extensamente utilizada, y en la que se basan parte los datos considerados por el módulo TETIS-SED es la USLE. En la cuenca del Guadalentín, Romero-Díaz et al.(2007) obtienen tasas de entre 11 y 36 t/Ha*año, con una media de 18 t/Ha*año. Otros autores obtienen con la USLE valores de medida de erosión de 30.62 t/Ha*año (Romero-Díaz et al., 1992), alcanzando valores puntuales máximos de 125 t/Ha*año (Lopez-Bermudez, 1990).

La técnica utilizada para la calibración del sedimento producido en la cuenca en el presente estudio consiste en su cubicación en diques de retención de sedimentos. Utilizando dicha técnica otros autores han obtenido distintos valores de erosión en zonas próximas o en las que se incluye el área de estudio. Concretamente, Romero-Díaz et al.(2007) estima valores de erosión por encima de 20 t/Ha*año a nivel regional (región de Murcia) y de 0.002 a 72.47 con una media 3.5 t/Ha*año en el área del río Quípar; Martín rosales et al.(2003) presentan resultados de erosión de anual entre 0.5 y 21 m³/Ha*año en la sierra de Gádor (entre 0.55 y 27.3 t/Ha*año en función de la densidad relativa del sedimento); y Cammeraat (2002; 2004) estima valores entre 0.08 y 30 t/Ha*año en los alrededores de la presa de Puentes.

La última técnica considerada en la medición de las tasas medias de erosión es la que se basa en la acumulación de sedimentos en presas hidráulicas (parecida a la anterior pero a mayor escala). Ésta técnica ha sido igualmente utilizada para la validación de la simulación calculada por el modelo TETIS-SED en el presente estudio. Utilizando dicha técnica, Romero-Díaz et al. (2007) identifica una media de erosión en las cuencas de la región de Murcia de 4 t/Ha*año. Baartman et al. (2012), determina una tasa de erosión de entre 0.68 y 0.00058 t/Ha*año a lo largo de nueve años en una cuenca cercana a Valdeinfierno, y en la zona del presente estudio, distintos autores señalan valores medios de sedimentación.de 4.8 t/Ha*año (Avedaño, 1997), 1.97 t/Ha*año (Sanz Montero et al., 1998), o 4.1 t/Ha*año (de Vente et al., 2008).

Con respecto a los estudios de sedimento anual acumulado en embalses, de Vente et al. (2005), obtiene tasas anuales de erosión en la cuenca del Segura de entre 1.5 y 10 t/Ha, aunque eventos extraordinarios como las lluvias intensas de 1973 pueden superar estas tasas.

La elevada variabilidad de resultados de las tasas de erosión se puede deber a la litología de la ladera, el tipo y profundidad de sus suelos, su uso y manejo, o la presencia de estructuras de erosión como cárcavas (Romero-Díaz et al., 2011), así como la longitud de la serie de datos disponible.

4.2. Implementación del modelo TETIS y el módulo TETIS-SED

En el presente apartado se exponen los datos y parámetros utilizados para la modelización hidrológica y sedimentológica, así como los resultados de las distintas aproximaciones que se han elaborado para estimar la producción de sedimento en la cuenca no aforada de Valdeinfierno, durante el periodo del que se dispone de datos instrumentales.

4.2.1. Datos y parámetros hidrológicos

El modelo hidrológico simula la respuesta hidrológica superficial y subterránea de la cuenca a distintos eventos de precipitación. Para ello requiere de la información topográfica, el tipo y comportamiento estacional (*fenología*) de la vegetación y los usos y las propiedades físicas del suelo. Estos parámetros se han obtenido de cartografías temáticas y bases de datos asociadas disponibles en distintos organismos públicos, así como de observaciones y muestras de campo y análisis de laboratorio realizados para este trabajo. En el presente apartado se expone el tratamiento y adaptación de estos parámetros para la aproximación de la hidrología de la cuenca de Valdeinfierno mediante el modelo TETIS.

4.2.1.1. Parámetros determinados por la topografía

La topografía de la cuenca de Valdeinfierno, se ha implementado utilizando un modelo digital del terreno (MDT), obtenido mediante la generalización a una resolución de 100 x 100 m de los datos de elevaciones de 25 x 25 m del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), elaborado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) (Figura 4.2 A).

Los cálculos espaciales generados a partir del MDT han permitido la obtención de los diferentes mapas de información espacial que requiere la simulación hidrológica del modelo, tales como:

- **Mapa de pendientes:** Representa los valores de la pendiente media en la superficie (Figura 4.2 B).
- **Mapa de celdas acumuladas:** Calculado a partir del mapa de pendientes, donde cada celda tiene el valor del número de celdas que vierten hacia ella (Figura 4.2 C).
- **Mapa de velocidades del flujo en ladera:** Se han estimado mediante una simplificación de la fórmula de Manning para sección infinita (Radio hidráulico igual a calado) en la que se considera la relación entre calado (h) y rugosidad de Manning (n) constante ($h/n = 23/4$) por lo que la velocidad en ladera se calcula como la raíz cuadrada de dos veces la pendiente (Figura 4.2 D).

- **Mapa de dirección del flujo:** Muestra el punto cardinal (intervalos 45°) hacia el que vierte la celda en función de la pendiente (Figura 4.2 E).

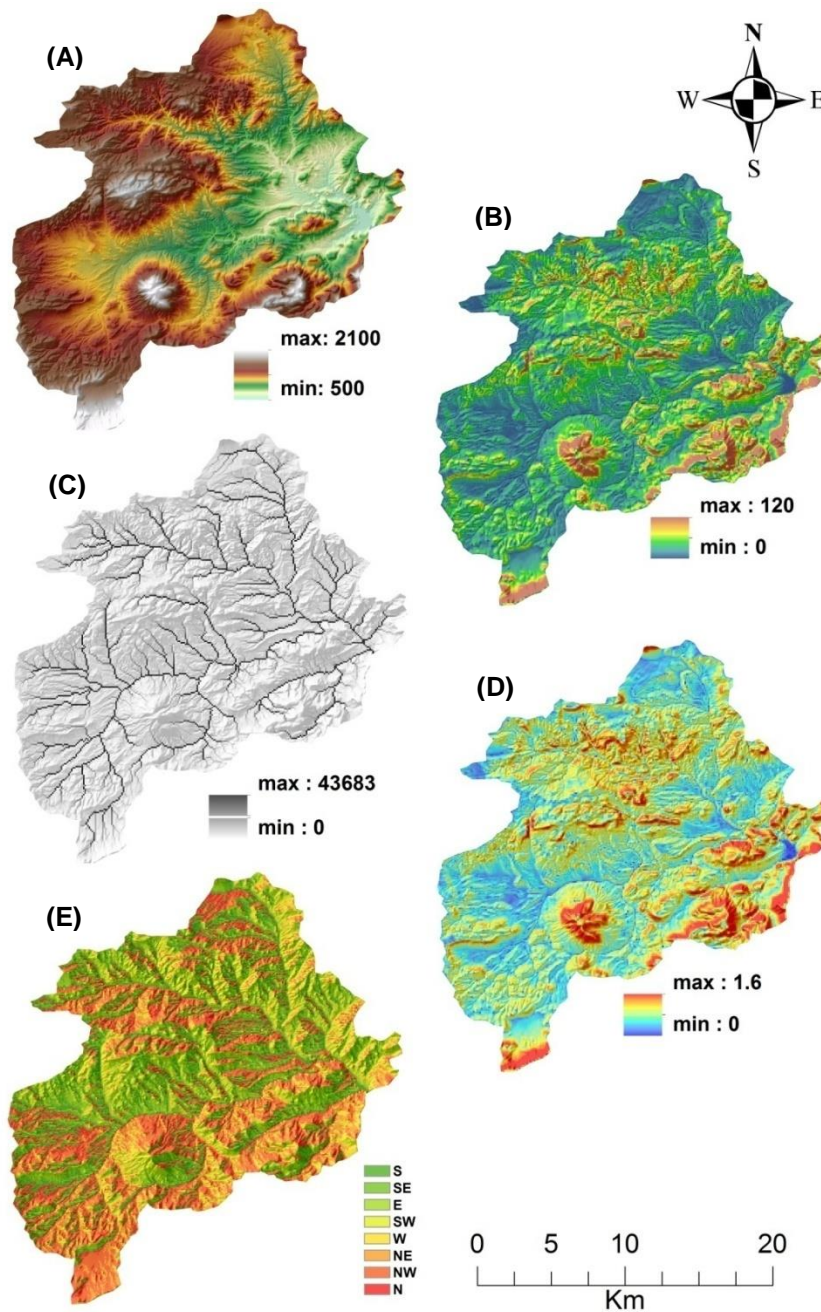


Figura 4.2: Modelo digital del terreno (A) y mapas calculados a partir de éste, necesarios para el modelo hidrológico: (B) Mapa de pendientes, (C) mapa de celdas acumuladas, (D) mapa de velocidades en ladera, (E) mapa de direcciones del flujo.

4.2.1.2. *Parámetros determinados por la vegetación y usos del suelo*

Para determinar la influencia de la cobertura vegetal y simular la hidrología en distintos intervalos de tiempo, de la forma más realista posible, se han generado cinco mapas de uso del suelo en función de la información disponible que representan los estados de usos para los años 1956, 1976, 1990, 2000 y 2006 (Figura 4.3).

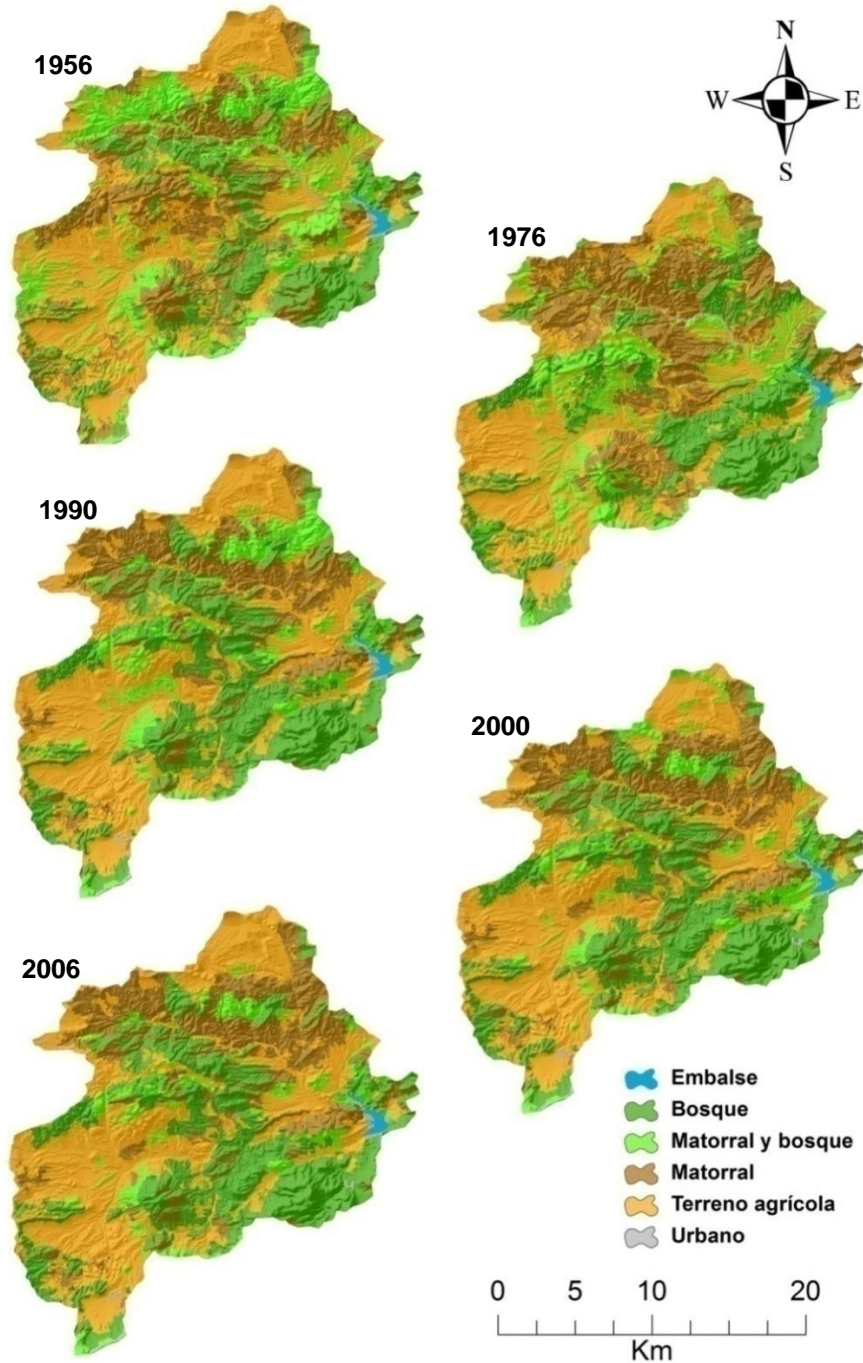


Figura 4.3: Mapas de usos del suelo simplificados en seis categorías. Corresponden los mapas de usos y aprovechamientos del suelo de la Junta de Andalucía de 1956, del Ministerio de Agricultura de 1976, y del proyecto CORINE-Land cover de 1990, 2000 y 2006

El mapa de usos del suelo de 1956 se ha obtenido de la Junta de Andalucía (Junta_de_Andalucía, 2003) está elaborado a partir de fotografías aéreas del vuelo americano del mismo año apoyado por los censos de vegetación disponibles. La cartografía de 1976 corresponde a, los mapas de usos y aprovechamientos publicados por el Ministerio de Agricultura a dicha fecha (MINISTERIO DE AGRICULTURA, 1976c, a, d, b). En el caso de los mapas de 1990, 2000 y 2006 se han obtenido del proyecto europeo CORINE-Land cover (EEA, 1995, 2000, 2006). Para homogeneizar los resultados, la información contenida en los distintos mapas se han simplificado a la resolución espacial de las celdas del modelo (100 x 100 m) y se han generalizado a cinco categorías de uso del suelo, en base al nivel de clasificación de mayor detalle del proyecto CORINE (Nivel 3). Para cada clase de uso del suelo se han establecido 12 coeficientes o factores de vegetación (Figura 4.4), correspondientes a cada mes, para determinar la evapotranspiración real. El valor de la interceptación máxima en función del uso del suelo se ha tomado de trabajos previos (Llorens et al., 1997; Belmonte Serrato et al., 1999; Belmonte-Serrato y Romero Díaz, 2006) (Tabla 4.1).

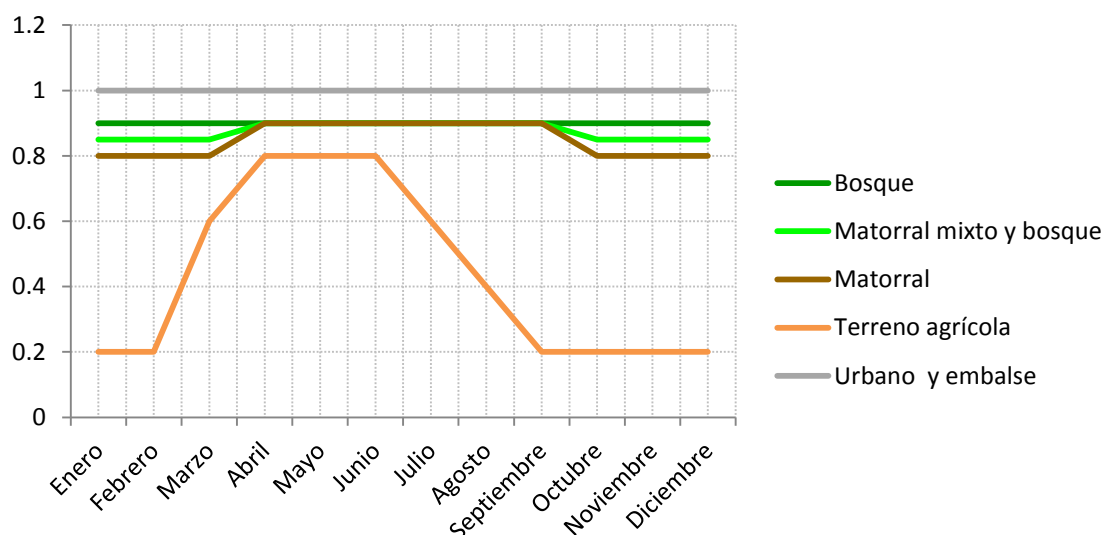


Figura 4.4: Valores de los factores de vegetación para cada uno de los tipos de uso del suelo considerados para el modelo.

Uso suelo	Intercepción
bosque	10 mm;
matorral mixto bosque	6.5 mm;
matorral	3 mm;
cultivos	2 mm;
urbano	1 mm.

Tabla 4.1: Valores de los la interceptación máxima en función del uso del suelo en la cuenca de Valdeinfierno.

La evolución de los usos del suelo durante las últimas décadas proporciona la información indispensable para realizar la simulación en periodo instrumental de la cuenca de Valdeinfierno. Además supone una fuente de información sobre las tendencias de los cambios de gestión en la

zona, pudiendo ser utilizados como base para valorar la respuesta hidrológica y sedimentológica de la cuenca frente a distintas políticas de gestión de usos del suelo.

4.2.1.3. *Parámetros hidrológicos y geomorfológicos del suelo*

Nº ID suelo	Muestra	Prof. R.(cm)	C.E. (µS/cm)	M.O. Cal.	M.O. Ox.	Muestra (>2mm)	Muestra (≤2mm)	% Ar	% L	% Ac	C.text.	Da (t/m³)
23	23.1 vi37	50	211	2.49	1.13	0.6	91.5	64.4	15.6	20.0	F-Ac-Ar	1.15
0	0.1 vi38	30	333	8.51	4.41	2.5	77.8	24.6	31.6	43.8	Ac	1.60
41	41.1 vi34	25	220	4.46	2.47	6.2	76.7	35.4	41.0	23.6	F	1.62
33	33.3 vi2	25	204	3.94	0.31	0.9	83.6	3.8	36.8	59.4	Ac	1.65
51	51.1 vi33	35	199	6.80	1.75	0.0	79.6	15.2	27.4	57.4	Ac	1.51
45	45.1 vi18	100	278	8.53	4.88	31.4	50.6	43.4	31.2	25.4	F	1.54
11	11b.1 vi10	15	192	2.79	1.82	52.9	34.2	47.8	24.8	27.4	F-Ac-Ar	1.72
9	9a.1 vi27	25	202	6.16	2.32	20.3	59.4	25.6	27.0	47.4	Ac	1.55
14	14a.1 vi29	15	294	8.93	6.76	38.0	44.1	51.2	29.2	19.6	F	1.40
20	20.1 vi17	20	286	7.76	4.10	41.0	44.3	39.4	31.0	29.6	F-Ac	1.58
38	38.1 vi24	10	186	7.24	1.16	11.1	69.3	8.0	19.8	72.2	Ac	1.51
11	11.1 vi10	30	168	2.94	0.83	31.0	54.8	28.0	23.8	48.2	Ac	1.63
50	50.1 vi4	20	223	3.70	1.91	21.6	60.8	28.4	37.6	34.0	F-Ac	1.59
35	35b.1 vi9	20	119	5.84	0.86	1.0	73.5	8.6	19.4	72.0	Ac	1.48
49	49.1 vi30	20	214	9.70	3.57	22.4	55.9	32.8	31.2	36.0	F-Ac	1.45
45	45.2 vi18	100	172	7.91	4.47	31.1	47.6	46.8	31.2	22.0	F	1.53
9	9b.2 vi27	25	176	9.06	3.03	5.7	74.3	24.6	21.4	54.0	Ac	1.49
35	35.1 vi7	20	155	6.45	0.70	0.0	75.5	8.0	12.4	79.6	Ac	1.47
26	26.1 vi25	25	176	4.76	1.91	52.3	34.5	49.8	20.4	29.8	F-Ac-Ar	1.73
32	32.1 vi31	100	270	15.68	9.89	63.5	23.5	42.4	34.2	23.4	F	1.35
33	33.1.2 vi12	25	176	4.92	0.57	0.5	82.4	10.6	30.0	59.4	Ac	1.63
39	39b.1 vi19	25	235	6.75	3.99	27.5	50.3	32.4	40.0	27.6	F-Ac	1.66
22	22.1 vi14	35	217	6.44	1.53	1.7	78.7	18.6	30.2	51.2	Ac	1.51
39	39a.1 vi8	20	179	4.96	1.08	36.1	43.9	26.0	30.4	43.6	Ac	1.57
40	40.1 vi6	30	162	2.56	0.32	22.0	61.8	13.2	43.6	43.2	Ac-L	1.64
50	50.2 vi4	20	166	2.49	0.89	6.2	76.7	33.2	34.0	32.8	F-Ac	1.78
34	34.1 vi32	25	309	11.51	5.10	30.5	51.7	27.0	27.8	45.2	Ac	1.40
4	4.1 vi39	40	195	7.28	2.62	46.4	40.5	34.4	31.2	34.4	F-Ac	1.50
6	6.1 vi40	20	204	6.6	3.49	36.6	47.8	48.0	25.6	26.4	F-Ac-Ar	1.59
25	25.1 vi41	40	185	4.83	2.06	30.6	56.4	42.8	25.0	32.2	F-Ac	1.59
25	25.2 vi41	40	235	5.23	3.3	38.2	48.9	59.2	18.8	22.0	F-Ac-Ar	1.61
1	1.1 vi42	45	156	3.37	1.31	5.2	85.7	31.0	39.0	30.0	F-Ac	1.72
3	3.1 vi43	15	147	3.14	0.93	21.9	67.3	32.2	38.2	29.6	F-Ac	1.79
2	2.1 vi44	20	157	3.71	1.12	2.3	86.5	27.2	36.8	36.0	F-Ac	1.72
5	5.1 vi45	25	183	3.47	1.87	29.2	61.3	34.4	39.6	26.0	F	1.71
15	15.1 vi46	15	166	4.08	1.56	38.5	50.6	23.2	20.8	56.0	Ac	1.72
42	42.1 vi48	50	267	6.75	3.18	22.4	65.6	24.4	28.0	47.6	Ac	1.60
47	47.1 vi49	20	271	7.86	4.99	34.7	51.8	36.4	29.6	34.0	F-Ac	1.55
28	28.1 vi50	50	172	4.42	2.37	33.6	54.6	34.0	24.4	41.6	Ac	1.60
13	13.1 vi51	35	201	6.06	2.99	54.9	34.9	24.2	30.2	45.6	Ac	1.54
12	12.1 vi52	25	187	3.93	2.18	43.9	45.5	38.2	22.2	39.6	F-Ac / Ac	1.68
8	8.1 vi53	35	196	4.43	1.99	20.1	66.7	24.4	34.0	41.6	Ac	1.62
7	7.1 vi55	45	154	3.45	1.12	19.4	69.3	22.4	30.0	47.6	Ac	1.68
19	19.1 vi56	20	184	3.13	0.91	1.7	83.8	10.4	30.4	59.2	Ac	1.70
16	16.1 vi57	35	203	5.52	1.22	11.1	69.9	14.6	24.0	61.4	Ac	1.50
10	10.1 vi59	60	329	6.85	3.84	36.1	51.5	44.4	20.0	35.6	F-Ac	1.68
29	29.1 vi60	50	203	5.12	1.83	5.1	81.1	16.4	30.2	53.4	Ac	1.62
44	44.1 vi61	60	323	10.91	6.4	11.4	72.9	40.8	32.0	27.2	F-Ac / F	1.44
46	46.1 vi63	55	167	2.46	0.79	1.6	89.8	30.8	38.0	31.2	F-Ac	1.70
31	31.1 vi64	5	135	2.09	0.37	51.0	40.6	18.8	54.2	27.0	F-Ac-L	1.70
27	27.1 vi67	55	230	4.71	2.13	26.4	60.4	28.8	30.4	40.8	Ac	1.65
37	37.1 vi68	40	182	3.63	1.4	11.0	80.7	24.0	30.6	45.4	Ac	1.53
24	24.1 vi69	5	2170	17.34	1.34	28.3	63.6	no se dispersa				1.21
36	36.1 vi70	20	650	4.43	1.22	21.3	67.2	14.6	26.4	59.0	Ac	1.60
43	43.1 vi76	60	223	6.12	3.84	33.7	55.9	32.4	32.4	35.2	F-Ac	1.49
49	49b.1 vi78	5	145	2.33	1.04	9.3	77.2	23.0	32.2	44.8	Ac	1.69
17	17.1 vi80	25	325	7.22	4.26	31.6	58.6	22.8	28.0	49.2	Ac	1.58
18	18.1 vi83	40	241	6.42	4.45	15.5	72.6	28.6	30.2	41.2	Ac	1.62
30	30.1 vi 84	30	215	5.23	4.08	50.7	38.8	47.2	29.8	23.0	F	1.77

Tabla 4.2: Características de los suelos de la cuenca de Valdeinfierno, resultantes de 59 muestras tomadas en campo, para esta Tesis Doctoral, en los distintos tipos de suelo diferenciados en la leyenda de los mapas del proyecto LUCDEME del Ministerio de Agricultura.

La cartografía de los suelos y la nomenclatura utilizada en este estudio corresponde a los mapas del Proyecto LUCDEME (Pujalte et al., 1990; Universidad_de_Murcia, 1990b, a; Pujalte et al., 1993). Esta cartografía se ha complementado con la realización de catas de cada uno de los tipos de suelos identificados en la cuenca de estudio. Estas catas han permitido la descripción de los principales horizontes y la toma de muestras para su análisis en laboratorio. En total se han

analizado 59 muestras, que cubren la totalidad de los suelos representados en la cartografía del Proyecto LUCDEME (Tabla 4.2).

Combinando los tipos de suelo, los usos y la información geológica obtenida mediante los mapas geológicos 930 (Puebla de Don Fadrique; Guzman del pino y Baena Perez, 1978), 931 (Zarcilla de Ramos; Baena Pérez, 1972), 951 (Orce; Baena Perez et al., 1978) y 952 (Vélez Blanco; (Baena Perez et al., 1976), de la serie MAGNA del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) a escala 1:50.000, se han establecido las características hidrológicas de la cuenca.

- **Humedad óptima del suelo (H^*):** La humedad del suelo (o contenido de agua disponible) ha sido determinada mediante curvas de pedotransferencia (Saxton y Rawls, 2006), partiendo de la composición textural, el contenido de materia orgánica (determinado mediante oxidación) y la salinidad de los suelos (Tabla 4.2, Figura 4.5). La humedad óptima depende únicamente tipo de suelo, por lo que las unidades cartográficas coinciden con los polígonos del mapa LUCDEME. La profundidad de los suelos y de penetración máxima de las raíces en cada uno de los suelos identificados se ha determinado mediante observaciones de campo.
- **Almacenamiento capilar del suelo (H_u):** El almacenamiento capilar (o estático) ha sido calculado como el producto entre el contenido de agua disponible y la profundidad del suelo sumado a los almacenamientos superficiales, calculados a partir de la pendiente y los usos del suelo (Figura 4.5). Se observa que los valores de este parámetro son mayores en los valles y en las zonas de cultivos y menores en las zonas de laderas más pronunciadas.
- **Capacidad de infiltración del suelo (K_s):** La capacidad de infiltración (o conductividad hidráulica) del suelo es proporcional al contenido de arena de los suelos, y también ha sido calculada mediante curvas de pedotransferencia (Saxton y Rawls, 2006).
- **Capacidad de percolación del suelo (K_p):** La capacidad de percolación (o conductividad hidráulica) del sustrato se ha determinado en función de las litologías obtenidas del mapa geológico, definiendo un valor de conductividad para cada litología (Puricelli, 2003) (Tabla 4.3, Figura 4.5).
- **Pérdidas al acuífero (K_{ps}):** Las pérdidas hacia el acuífero se han calculado, siguiendo las recomendaciones de la bibliografía, como la décima parte de la conductividad hidráulica saturada del suelo (Puricelli, 2003; Frances et al., 2007; Bussi et al., 2009; Velez et al., 2009), (Figura 4.5)

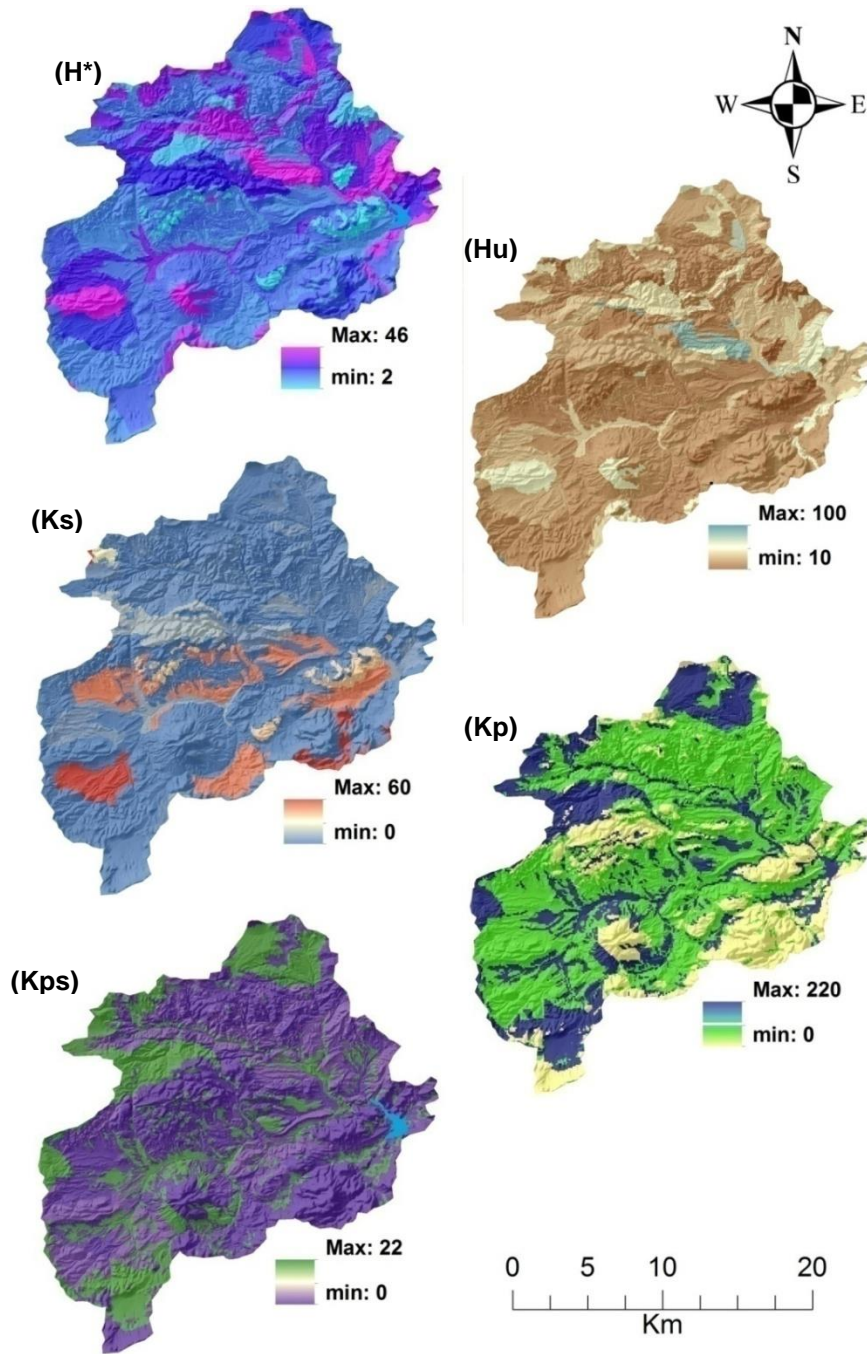


Figura 4.5: Parámetros hidrológicos de la cuenca suministrados al modelo TETIS: (H*) Valores de humedad óptima del suelo; (Hu) Valores de almacenamiento capilar del suelo (o almacenamiento estático máximo); (Ks) Valores de capacidad de infiltración del suelo (o conductividad hidráulica saturada del suelo); (Kp) Valores de la capacidad de percolación del suelo (o conductividad hidráulica saturada del sustrato); (Kps) Valores de las pérdidas al acuífero.

Puntos de control: Son los elementos del terreno en los que se dispone de información o datos conocidos de los parámetros a calcular por el modelo TETIS, y que permiten calibrar y validar los resultados de las modelizaciones. En el caso de la simulación hidrológica, el punto de control para toda la cuenca es la presa de Valdeinfierno, y los datos para la calibración corresponden a los caudales de entrada al embalse (o de salida de la cuenca).

Sustrato	Conductividad hidráulica (mm/h)
Arcillas	0.4
Arcillas y conglomerados	200
Arcillas y areniscas	20
Areniscas	40
Calizas	0.4
Calizas y areniscas	20
Calizas y margas	22
Conglomerados	400
Conglomerados y areniscas	220
Conglomerados y calizas	200
Dolomías	0.004
Gravas y arenas	220
Limos y arenas	220
Limos y conglomerados	200
Margas	4
Margas y arcillas	2.2
Margas y areniscas	22
Margas y conglomerados	200
Margas y limo	4
Margas y yeso	4
Aluvial	200
Rocas metamórficas	0.004
yesos	4

Tabla 4.3: conductividad hidráulica del sustrato, determinada mediante la reclasificación del mapa geológico (Puricelli, 2003).

Puesto que la cuenca de estudio no está aforada, los valores de caudal de salida de la cuenca se han calculado mediante los datos disponibles de volumen y salidas del embalse procedentes de dos fuentes distintas. Por un lado se ha utilizado la serie de datos diarios del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) (volúmenes, nivel y caudal de salida por compuerta del embalse de Valdeinfierno) correspondientes a los años hidrológicos entre 1971 y 2009. Estos datos permiten estimar el caudal de entrada al embalse. La segunda fuente de información consiste en la serie de datos cincominutales de volúmenes del embalse desde 1997 hasta 2012, procedentes del Sistema Automático de Información Hidrográfica (SAIH), generalizados para poder ser utilizados y comparados con la escala diaria del CEDEX con el objeto de localizar divergencias entre datos y completar las series instrumentales.

Se han observado diferencias significativas entre ambas fuentes de datos de caudal de salida. Analizando los datos y la información de las estaciones que los generan se ha establecido que el desfase está determinado por el hecho que el sensor del SAIH mide únicamente el nivel de embalse, mientras que los datos del CEDEX contienen también valores diarios de caudales de salida de la presa. Por tanto, cuando se hace un balance diario con los datos del SAIH, se omite una parte del caudal. Para minimizar el error, debido a la falta de datos de salida del embalse cuando se emplean los datos del SAIH, se ha calculado la diferencia entre medidas consecutivas en los datos cincominutales, y se ha sumado el cómputo de los valores absolutos de las diferencias en 24h. Esta corrección ha resultado ser efectiva para minimizar el desfase entre datos de ambas fuentes.

Para la definición del caudal de salida de la cuenca se han priorizado los datos de nivel y salida de embalse del CEDEX, ya que al ser datos directos se ha considerado que son más fiables. No obstante, para los periodos sin disponibilidad de datos (Noviembre 2010 -

Diciembre 2012), se han utilizado los datos calculados a partir de las medidas del SAIH, lo que ha permitido definir el periodo instrumental desde 1971 hasta 2012.

Además de la información hidrológica, el modelo TETIS requiere la introducción de parámetros específicos relativos a la morfología de los cauces. Estos parámetros geomorfológicos dependen de las relaciones entre las características físicas de los cauces, su carga sedimentaria y los caudales que circulan por ellos. Se calculan mediante determinación de coeficientes y exponentes empíricos utilizando el caudal a sección llena, la pendiente y el diámetro medio del sedimento.

En el presente estudio, los coeficientes y exponentes calculados se basan en los determinados por Conesa García y Álvarez Rogel (1996) en una zona de características similares (Tabla 4.4).

Parámetro	Valor
κ	0.684
c_1	6.516
c_d	15.000
c_n	0.047
φ	0.960
ε_1	0.488
ε_2	0.200
θ	1.000
ξ	0.167

Tabla 4.4: Coeficientes (κ , c_1 , c_d , c_n) y exponentes (φ , ε_1 , ε_2 , θ , ξ) geomorfológicos de la cuenca de Valdeinfierno calculados a partir de los resultados de Conesa García y Álvarez Rogel (1996) en una cuenca de características similares.

Estos datos y parámetros determinan la hidrología de la cuenca que supone la base de todo el modelo. Por este motivo, dada la complejidad de las interrelaciones entre parámetros y el volumen de información introducido, se debe tener mucha precaución con los errores e introducir en el modelo datos de máxima calidad, ya que localizar errores y corregirlos posteriormente puede resultar prácticamente imposible.

4.2.2. Datos meteorológicos

Junto con la información intrínseca de la cuenca es necesario definir los eventos meteorológicos a partir de los que se pretende simular su respuesta hidrológica. En la cuenca de Valdeinfierno, se dispone de una serie de datos diarios de precipitación y de temperatura para el periodo 1918-2012 9 estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Además existe una serie de datos cincominutales de precipitación en 4 estaciones desde 1997 hasta 2012 procedentes del SAIH.

Al igual que para el cálculo de caudal, los datos del SAIH se han generalizado a escala diaria para equipararlos a los datos de la AEMET y valorar su homogeneidad, continuidad y posibles errores.

Comparando ambas series de datos, se han localizado ligeras diferencias entre las distintas fuentes de información a lo que se añaden varios periodos de interrupción del registro tanto en estaciones de la AEMET como del SAIH. En los casos de discordancia entre datos se ha analizado la consistencia de cada uno de ellos con los días anteriores y posteriores. Y con los datos de caudal del embalse, eligiendo el dato más consistente. Como criterio general se ha priorizado el dato de la AEMET, ya que al ser la serie más larga de las disponibles tiene más peso en el modelo. En cuanto a la pérdida de datos, puesto que el modelo incluye un módulo de simulación de lluvia para los días sin información, no se ha intentado completar las series.

A pesar de la existencia de curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), que permiten diseñar hietogramas de la distribución de la precipitación total a menor escala temporal sobre la cuenca, se ha decidido conservar la escala diaria de precipitación por dos motivos.

(1) El primer motivo es el peso computacional del cálculo en el modelo; puesto que se pretende definir el comportamiento hidrológico y sedimentológico de la cuenca para grandes intervalos de tiempo, la reducción de la escala temporal limita la capacidad de procesado ya que los intervalos de tiempo entre observaciones introducidas en el modelo debe ser constante. Esta condición implica que, por ejemplo, si se redujera la escala de diaria a horaria, el peso de la computación para cada intervalo sería 24 veces superior, o si se planteara la utilización de la resolución de los datos cincominutales del SAHI, el peso de computación sería varios órdenes de magnitud superior.

(2) El segundo motivo es la fiabilidad de los datos de precipitación para la calibración y validación. Pese a la existencia de los datos cincominutales del SAHI, la limitada distribución espacial de sus estaciones y la corta longitud de sus registros reduce su representatividad, y consecuentemente su fiabilidad en la modelización a escala de cuenca. Los registros de la AEMET han mostrado una mayor fiabilidad a escala diaria, son sustantivamente más largos y tienen una distribución geográfica mucho mayor. La modificación de estos datos respecto a las curvas IDF conduce a la diversificación de valores de intensidad que influyen muy notablemente sobre la escorrentía y la erosión.

La falta de información detallada dificulta la selección de la curva IDF a implementar de entre las múltiples curvas de intensidad en función de la duración del evento.

Debido a que la calibración y validación sobre los datos instrumentales determinan la modelización de la cuenca, incluyendo todos los escenarios de cambios pasados o futuros que se pretenda simular sobre ella, se ha optado por la solución más conservadora que consiste en utilizar los datos con distribución espacial más representativa (AEMET) en su escala de medida (diaria).

Además de series de precipitación, el modelo requiere datos de evapotranspiración de referencia. Este parámetro se ha calculado mediante la fórmula de Hargreaves (Allen et al., 1998) y las temperaturas máxima y mínima facilitadas por la AEMET. Puesto que en el caso de la

evapotranspiración la serie de datos tiene que ser necesariamente continua, ha sido necesario completar los datos siguiendo diversos procedimientos:

- (1) En días sin registro de temperatura máxima o mínima se ha aplicado la media de la diferencia entre máximo y mínimo de los días anterior y posterior.
- (2) En días sin ninguna de las dos temperaturas se han calculado ambas como la media de los días adyacentes.
- 3). En periodos con una ausencia prolongada de datos se han introducido las temperaturas medias mensuales calculadas a partir de todo el registro disponible.

Los datos meteorológicos y de caudal de salida de la cuenca se introducen en el modelo TETIS de forma unificada.

4.2.3. Parámetros de erosión del suelo

Los procesos hidrológicos relacionados con la erosión se consideran en el modelo hidrológico distribuido TETIS mediante el modulo de transporte de sedimentos SED (en adelante TETIS-SED; Bussi et al., 2014). La erosión de suelo depende principalmente de la erosividad de la lluvia y de la erosionabilidad del terreno. En el módulo TETIS-SED, este último factor se obtiene, por un lado, a partir de la erodibilidad natural del material estimado a partir de sus propiedades físicas y, por otro, la protección que ofrecen los usos del suelo frente a la erosión (Wischmeier y Smith, 1978; Almorox et al., 1994).

4.2.3.1. Parámetros de protección del suelo frente a la erosión

Los factores utilizados para determinar la protección del suelo frente a la erosión se basan en el uso y gestión del suelo. Los elementos de cálculo utilizados por el TETIS-SED en este apartado consisten en los factores de prácticas agrícolas (P) y los usos y gestión de los cultivos (C) de la ecuación universal de la pérdida de suelo (USLE) (Wischmeier y Smith, 1978).

- **Factor de prácticas agrícolas de la USLE (P):** Siguiendo las recomendaciones de Almorox et al. (1994), se ha asignado el valor de $P=1$ a toda la cuenca, con la excepción de los campos de cultivo con direcciones de arado perpendiculares a las líneas de máxima pendiente. Estos campos se han localizado mediante el MDT, las imágenes del Plan Nacional de Ortofotografía aérea de España (PNOA) y fotografías aéreas del vuelo interministerial de 1973, y se les ha asignado un valor de $P=0.75$. (Wischmeier y Smith, 1978) (Figura 4.6).

Puesto que se han considerado distintas modelizaciones para distintos periodos y usos del suelo (Figura 4.3), se ha analizado la influencia de la modificación del factor P de la USLE en el módulo TETIS-SED. Para ello, se ha simulado el mismo periodo aplicando y sin aplicar el factor de corrección de cultivos con arado perpendicular a la dirección de máxima pendiente de la ladera.

La comparación entre ambas simulaciones no ha aportado diferencias significativas a nivel hidrológico ni sedimentario, por lo que se ha considerado que la aplicación del factor P unitario en todos los intervalos no afecta al resultado. No obstante, en el periodo instrumental se ha aplicado la distribución del factor P presentado en el mapa de la Figura 4.6, debido a que se ha comprobado que las fotografías aéreas del vuelo interministerial de 1973 y las fotografías del PNOA actuales reflejan las mismas técnicas agrícolas.

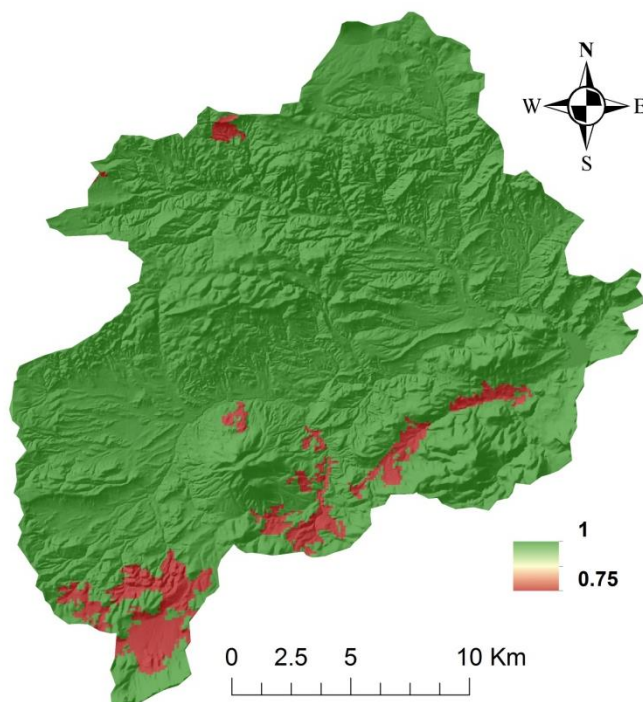


Figura 4.6: Mapa de la distribución del parámetro P de la USLE en la cuenca con valor de $P=0.75$ en los cultivos con arado perpendicular a dirección de máxima pendiente de la ladera y $P=1$ en el resto, utilizando las zonas determinadas mediante las imágenes del PNOA, según los valores propuestos por Wischmeier and Smith, (1978) y siguiendo las recomendaciones de Almorox et al.(1994).

- **Factor de vegetación y gestión agrícola de la USLE (C):** El factor C de la USLE se ha estimado a partir de la reclasificación del nivel 3 de los mapas de uso del suelo del proyecto europeo CORINE-Land cover, tal y como se indica en la Tabla 4.5 (de Vente et al., 2008).

Clase de uso del suelo	Factor C
Áreas urbanas	0.00
Cultivos en secano	0.44
Cultivos en regadío	0.25
Arrozales	0.05
Huerta	0.35
Cultivos arbóreos	0.30
Áreas agrícolas heterogéneas	0.30
Bosque de caducifolias	0.002
Bosque de coníferas	0.004
Bosque mixto	0.003
Pastos naturales	0.08
Matorral	0.03
Superficies desnudas > 1000 m s.n.m	0.12
Superficies de agua	0.00
Badlands	0.80

Tabla 4.5: Valores adoptados para el factor C de la USLE en base a los distintos usos del suelo, considerados mediante la modificación de los datos del proyecto CORINE-*Land cover* nivel 3 (de Vente et al., 2008), en la cuenca de Valdeinfierno, y la presencia de suelos degradados.

La localización de zonas con presencia de suelos degradados (*badlands*) se ha obtenido mediante las ortofotografías del PNOA actuales, fotografías aéreas del vuelo interministerial de 1973 y observaciones de campo. En estas zonas se ha modificado el valor del factor C de la USLE (Almorox et al., 1994; Alatorre et al., 2010 ;Figura 4.7).

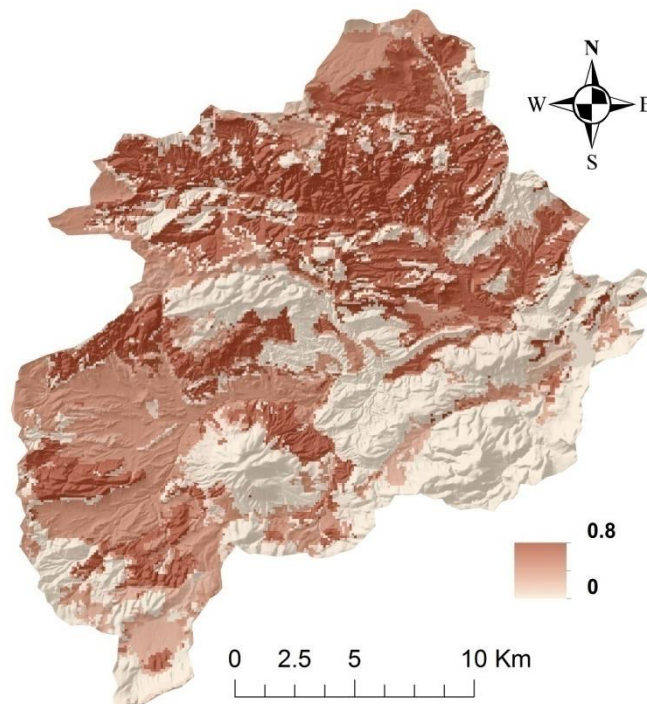


Figura 4.7: Mapa de la distribución del parámetro C de la USLE en la cuenca para los usos del suelo del mapa CORINE de 2006, con valores comprendidos entre C=0 y C=0.44 siguiendo el ejemplo de deVente et al. (2008) y considerando el valor de C=0.8 en las zonas de *badlands* (Almorox et al., 1994; Alatorre et al., 2010), localizadas en las imágenes del PNOA actuales, que determinan los distintos usos del suelo de la cuenca.

Se ha analizado la influencia de la modificación del factor C de la USLE en el módulo TETIS-SED según la consideración de la degradación de suelos (Bussi et al., 2014). El

procedimiento ha sido el mismo que el que se ha expuesto para el parámetro P. La comparación entre ambas simulaciones ha aportado diferencias poco significativas aunque mayores que las determinadas en el factor P, tanto a nivel hidrológico como sedimentario.

Aunque las diferencias obtenidas en el modelo son pequeñas, se considera que siempre que sea posible se debe incorporar la información de la degradación del suelo al factor C, aunque si no se incluye el error no es crítico. En general, se ha comprobado que las fotografías aéreas del vuelo interministerial de 1973, las fotografías del PNOA actuales y las observaciones de campo reflejan las mismas áreas de suelos altamente degradados, por lo que éstas se han considerado constantes para todo el periodo instrumental.

Al contrario de los parámetros propios de la cuenca, los parámetros de protección del suelo frente a la erosión dependen en gran medida de las actividades humanas (Hoffman y Rohde, 2007; Lique et al., 2009). Estos parámetros suponen una de las principales herramientas para modificar el potencial erosivo de los eventos de precipitación a corto, medio y largo plazo. Las actividades humanas sobre el territorio, y en particular las prácticas agrícolas, dependen de variables socio-políticas y económicas. Desde la entrada de España en la Unión Europea, los principales factores de influencia en zonas rurales suelen ser las ayudas y subvenciones encaminadas a potenciar la actividad agrícola (Oñate et al., 1998; Boellstorff y Benito, 2005; Rodrigo y Barriendos, 2008), el turismo y la gestión y protección de los espacios naturales (Agencia de Medio Ambiente, 1994, 2005). Este factor se discutirá en los próximos apartados, y se ha considerado como estable en la determinación de los parámetros del modelo en la configuración de cada uno de los periodos simulados.

4.2.3.2. Erosionabilidad del suelo

El módulo TETIS-SED determina la erosionabilidad mediante un conjunto de parámetros de los suelos presentes en la cuenca (Bussi et al., 2014), y que se exponen a continuación. Los cálculos necesarios para determinar la disponibilidad del sedimento, se han elaborado siguiendo las recomendaciones de Almorox (1994) y según los valores y nomogramas de Wischmeier y Smith (1978) utilizando observaciones de campo y análisis de muestras de los distintos suelos. El valor de los parámetros se ha extrapolado a toda la cuenca mediante el mapa de suelos derivado del proyecto LUCDEME (Pujalte et al., 1990; Universidad_de_Murcia, 1990b, a; Pujalte et al., 1993).

- **Factor de erosionabilidad de la USLE (K):** El factor K de la USLE ha sido estimado a partir de la textura, y el contenido de materia orgánica medido en las muestras de suelo recogidas en campo (Tabla 4.2), utilizando la fórmula 4.1. (Almorox et al., 1994) modificada de (Wischmeier et al., 1971), cuyos parámetros empíricos se basan en los nomogramas de Wischmeier y Smith (1978) (Figura 4.8).

$$K = \frac{10^{-4} * 2.7 * (100 - Ac) * (L + Ar) * (12 - M) + 4.2 * (E - 2) + 3.2 * (P - 3)}{100} \quad 4.1$$

Donde:

- Ac, L y Ar indican los porcentajes de arcilla limo y arena respectivamente.
- M consiste en el porcentaje de materia orgánica.
- E consiste en un número que determina la textura donde 1 indica granular muy fina, 2 granular de fina a media, 3 granular de media a gruesa y 4 masiva (roca). Cada valor se ha definido mediante la granulometría y las observaciones de campo.
- P determina la permeabilidad donde 1 indica rápida (125-250 mm/h), 2 de rápida a moderada (62-125mm/h), 3 moderada (20-62mm/h), 4 de moderada a lenta (5-20mm/h), 5 lenta (1.2-5 mm/h) y 6 muy lenta (<1.2mm/h). Cada valor se ha calculado mediante las ecuaciones de Saxton and Rawls (2006).

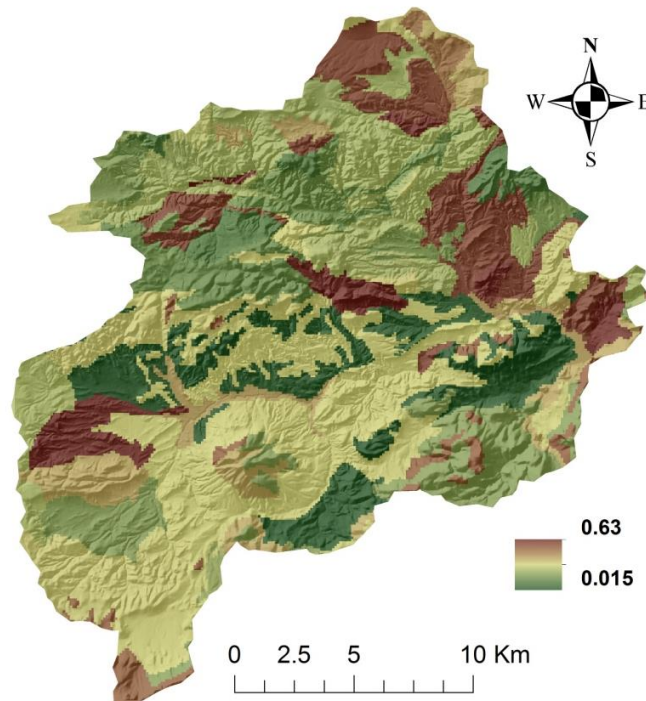


Figura 4.8: Mapa de la distribución del parámetro K de la USLE en los suelos de la cuenca de estudio con valores comprendidos entre K=0.015 y K=0.63 y que indica su erosionabilidad.

- **Textura sedimentaria:** La textura de la parte superficial del suelo ha sido obtenida mediante el análisis textural de las muestras de campo (Tabla 4.2) extrapolando los resultados a toda la cuenca mediante el mapa de suelos del proyecto LUCDEME (Figura 4.9).

Los valores de la composición textural de los suelos de la cuenca permiten al módulo TETIS-SED determinar los tamaños de grano disponibles en la cuenca, y unido a los demás parámetros del suelo calcular la disponibilidad de sedimentos.

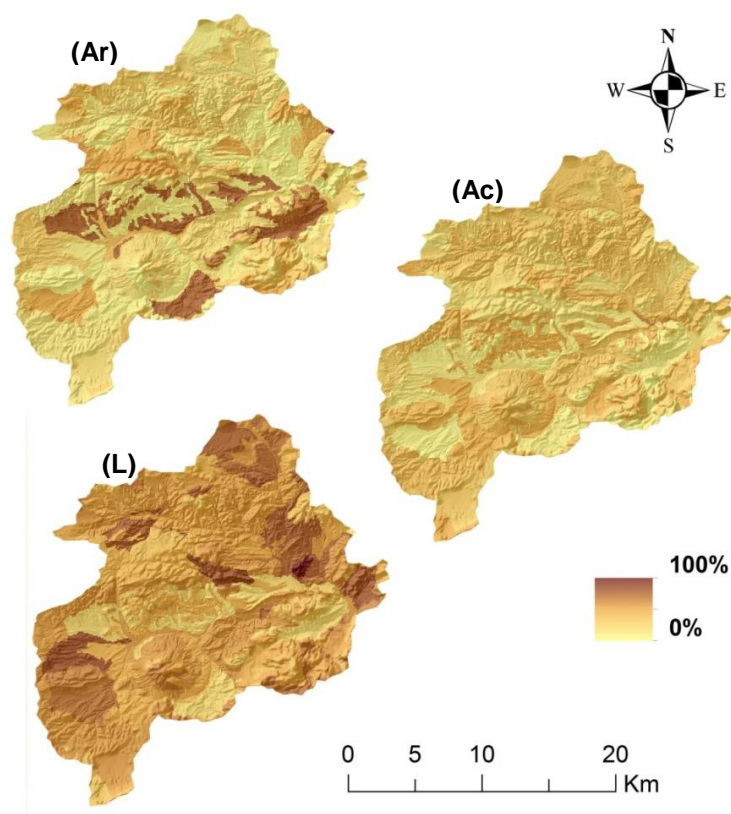


Figura 4.9: Mapa de la distribución de las texturas granulométricas en la cuenca, para cada uno de los suelos, expresadas en porcentaje. (Ar) arena, (Ac) arcilla y (L) limo.

La distribución de texturas en la cuenca permite conocer el volumen disponible y la extensión espacial del sedimento, ya que el modelo considera la energía necesaria para su movilización mediante la suma de energías necesarias para movilizar cada fracción textural.

4.2.4. Estimación de la producción de sedimento

La cuenca de estudio no dispone de aforo de sedimentos, por lo que la calibración de sedimentos del modelo TETIS-SED se ha realizado teniendo en cuenta evidencias indirectas de volumen de sedimento producido en la cuenca y acumulado en infraestructuras hidráulicas y forestales. En concreto, se ha utilizado el volumen de sedimentos acumulados en el Embalse de Valdeinfierno (Avedaño, 1997; Van Rompaey et al., 2001) y los retenidos en las infraestructuras hidráulicas forestales presentes en los cauces, siendo una técnica utilizada anteriormente para la estimación de tasas de erosión en el SE Español (Verstraeten y Poesen, 2001; Romero-Díaz et al., 2007; Boix-Fayos et al., 2008). En este sentido, se han estudiado un conjunto de diques de retención de sedimento con el objetivo de determinar el aporte de algunas de las sub-cuencas del área de estudio. A nivel de cuenca, se han estimado los aportes de

sedimentos totales mediante la comparación entre distintas batimetrías realizadas en el embalse de Valdeinfierno por el CEDEX (1976, 1984, 1995a).

4.2.4.1. *Selección de los diques de retención de sedimentos*

En la cuenca vertiente al embalse de Valdeinfierno existen varios centenares de diques de corrección hidrológica, construidos entre 1956 y la actualidad. La mayor parte de estos diques se encuentran parcial o completamente colmatados o destruidos.

En base a un trabajo anterior de Armas (1996), con datos inéditos proporcionados por estos autores, junto con datos facilitados por la Junta de Andalucía y a la localización en campo de diques mostrados en las Imágenes del PNOA, se han identificado un total de 279 diques que han sido revisados, y de los que se han seleccionado 10 para la determinación de la producción de sedimentos dentro de la cuenca (Figura 4.10, Tabla 4.6).

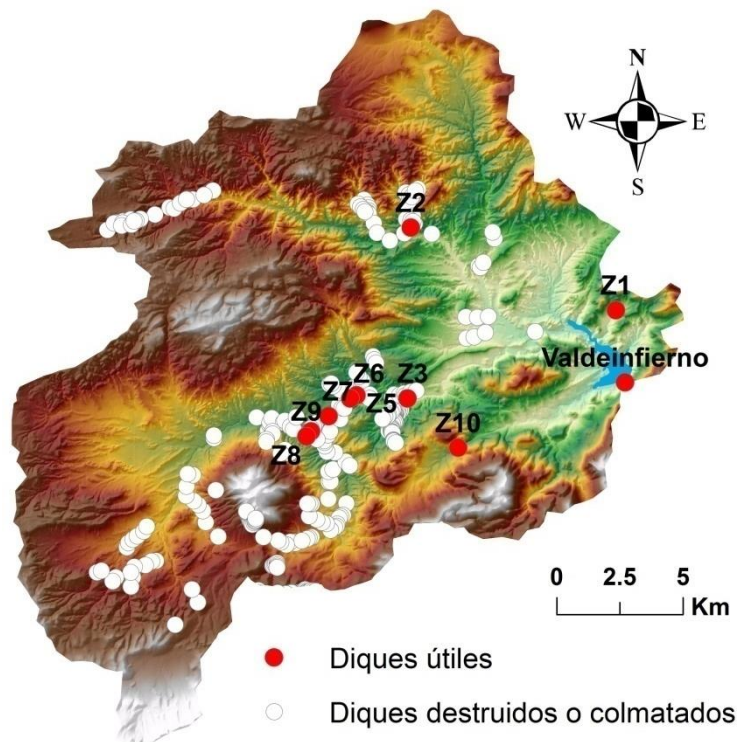


Figura 4.10: Mapa de la cuenca en el que se indica la localización de todos los diques de retención de sedimento en la cuenca de estudio. Los puntos blancos corresponden a la ubicación de los diques que no han podido ser utilizados ya que se encuentran destruidos o colmatados, mientras que los puntos rojos indican los diques seleccionados, con su identificador.

Los criterios para la elección de los diques han sido:

- **Fecha de construcción conocida:** Este dato es necesario para estimar el volumen de sedimento acumulado durante un período de tiempo conocido (Tabla 4.6).

- **Estabilidad estructural:** Para intentar minimizar los errores derivados de inestabilidades estructurales, se han elegido diques que no estuvieran total o parcialmente destruidos y que no presentaran signos evidentes de pérdidas.
- **Distribución espacial:** Se han seguido dos criterios complementarios. (1) Se ha intentado que los diques seleccionados tuvieran la máxima distribución geográfica para ser representativos de la variabilidad espacial de la cuenca. (2) En los barrancos que existe más de un dique y ninguno está colmatado, se han considerado todos ellos, para evitar errores por pérdidas de sedimento (Figura 4.10).
- **Estado de colmatación:** Se han escogido principalmente diques recientes con importante capacidad de retención, y donde se haya producido la sedimentación de materiales en forma de estratos con continuidad lateral y espesor centimétrico. De esta forma, los sedimentos retenidos que puedan ser descritos en términos de unidades sedimentarias asignadas a eventos de escorrentía individuales en los que se puede estimar el volumen de sedimento producido. La localización de diques donde el sedimento cumpla estos criterios es de gran importancia, ya que la identificación de niveles y la determinación de los volúmenes de materiales sedimentados en los diques y en la presa de Valdeinfierno son las únicas herramientas de las que se dispone para la calibración del módulo TETIS-SED.

Dique	Capacidad (m³)	Área drenada (km²)	Fecha de construcción	Ancho del dique (m)	Altura del dique (m)	Pendiente local
Z1	1071	0.37	2000	16.3	3.5	0.019
Z2	1713	2.41	2009	8.0	3.0	0.03
Z3	616	0.51	2009	13	3.5	0.101
Z5	11139	3.79	2009	20	4.5	0.013
Z6	9272	7.51	2009	30	5	0.032
Z6b	9135	7.71	2009	32	5	0.325
Z7	1539	0.77	2009	18	4.5	0.053
Z8	1565	0.44	2009	19	4	0.048
Z9	2901	0.36	2009	15.6	4.5	0.037
Z10	9936	9.71	1976	25	7.9	0.039

Tabla 4.6: Características geométricas y espaciales de los diques de retención de sedimentos considerados en la cuenca de la presa de Valdeinfierno. Los pares de diques Z6, Z6b y Z9, Z8 se encuentran en el mismo barranco dos a dos, el primero en cada par es el dique de aguas arriba.

Los datos de los puntos de control de la cuenca conforman los valores fijos sobre los que el modelo adapta sus resultados, afectando la fiabilidad de la modelización, por lo que se debe buscar, en medida de lo posible, su máxima precisión.

4.2.4.2. Determinación del volumen sedimento retenido en los diques

Con el fin de determinar las características geométricas y físicas de los diques y sus cubetas de colmatación (incluyendo sus depósitos), se ha procedido al levantamiento topográfico de su

superficie mediante tecnología de detección por láser (LIDAR) utilizando un láser escáner terrestre (TLS) o mediante posicionamiento dinámico por satélite (GPS-RTK), en las zonas donde no ha sido posible la medición con láser. Asimismo, se han cavado zanjas en los depósitos, con el fin de describir, analizar e interpretar el tipo y volumen total de sedimento que los conforman y la generación de sedimento que se produce en las distintas cuencas que los alimentan.

- **Medidas LIDAR:** La medición por láser permite medir miles de puntos por segundo con una gran precisión local (Bellian et al., 2005; Buckley et al., 2008). En la zona de estudio se ha utilizado el TLS modelo *Scanstation 2* de la marca Leica, que permite la medición espacial de hasta 50000 puntos/segundo con un error de 2mm a 100m, en condiciones ideales según el fabricante, aunque en condiciones de campo es mayor (Lichti et al., 2005; Soudarissanane et al., 2011). Este modelo de TLS se basa en la tecnología de tiempo de vuelo, que consiste en la determinación de la distancia de los objetos al sensor mediante la medida del tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso laser y su retorno. La resolución espacial utilizada para las mediciones ha sido de un punto cada dos centímetros a una distancia de 100m en el plano horizontal (Figura 4.11 A).

Puesto que se trata de una técnica de medida directa desde la visual del instrumento, en la mayoría de diques ha sido necesario más de un escaneo desde distintos puntos de estacionamiento, para evitar sombras y aberraciones en los datos. En cada uno de los diques, se han agrupado las distintas nubes de puntos medidos en cada estacionamiento mediante la posición relativa a un conjunto de dianas que se distribuyen a lo largo de la zona a escanear. El error derivado de la alineación es el error máximo en el plano horizontal, utilizado para el cálculo de errores (Tabla 4.7). Pese a sus evidentes ventajas, como son la velocidad y precisión de las medidas, la técnica también tiene algunas limitaciones importantes. La primera y más importante limitación es la imposibilidad de tomar medidas en aquellos diques que tengan presencia de agua en su vaso. Dado que se trata de una técnica de medida por luz, el agua genera distorsión de la señal por reflexión y difracción, y conlleva falsas medidas y la pérdida de la señal, en función de su turbidez y profundidad. En casos extremos, el agua absorbe la señal emitida y el instrumento no detecta el retorno, por lo que no puede calcular la posición de los puntos (Charlton et al., 2003; French, 2003; Heritage y Hetherington, 2007). Este problema ha imposibilitado la toma de medidas con TLS en el dique Z6.

La segunda limitación de la técnica de medida se plantea en aquellas presas con presencia de vegetación en el entorno y en el fondo de las cubetas de retención de los diques. El TLS es incapaz de determinar distintos tipos de objetivos, por lo que dada la resolución de los datos y la toma masiva de estos, toda la vegetación es escaneada conjuntamente con el sedimento (French, 2003; Heritage y Hetherington, 2007). Esta limitación no es tan crítica como la primera ya que si la cobertura vegetal no es muy

frondosa y se puede corregir. Para minimizar los errores debidos a la presencia de vegetación se han filtrado los datos láser mediante dos procesos sucesivos.

(1) Se ha generalizado el modelo digital derivado de los datos, a celdas de 0.1 x 0.1 m considerando como valor de celda el punto más bajo de todos los incluidos en ella (Marks y Bates, 2000; Thoma et al., 2005) (Figura 4.11 B).

(2) Se ha generado el modelo de elevaciones según los puntos filtrados permitiendo localizar y eliminar manualmente los puntos de vegetación restante (Charlton et al., 2003). En esta operación se han utilizado como referencia los puntos más bajos más un margen de cota, en áreas reducidas (Figura 4.11 C). El margen de cota utilizado para filtrar los puntos se ha definido como el error máximo de cota en las áreas con vegetación (Tabla 4.7). La frondosidad de la vegetación no ha permitido la toma de datos con TLS en el dique Z10.

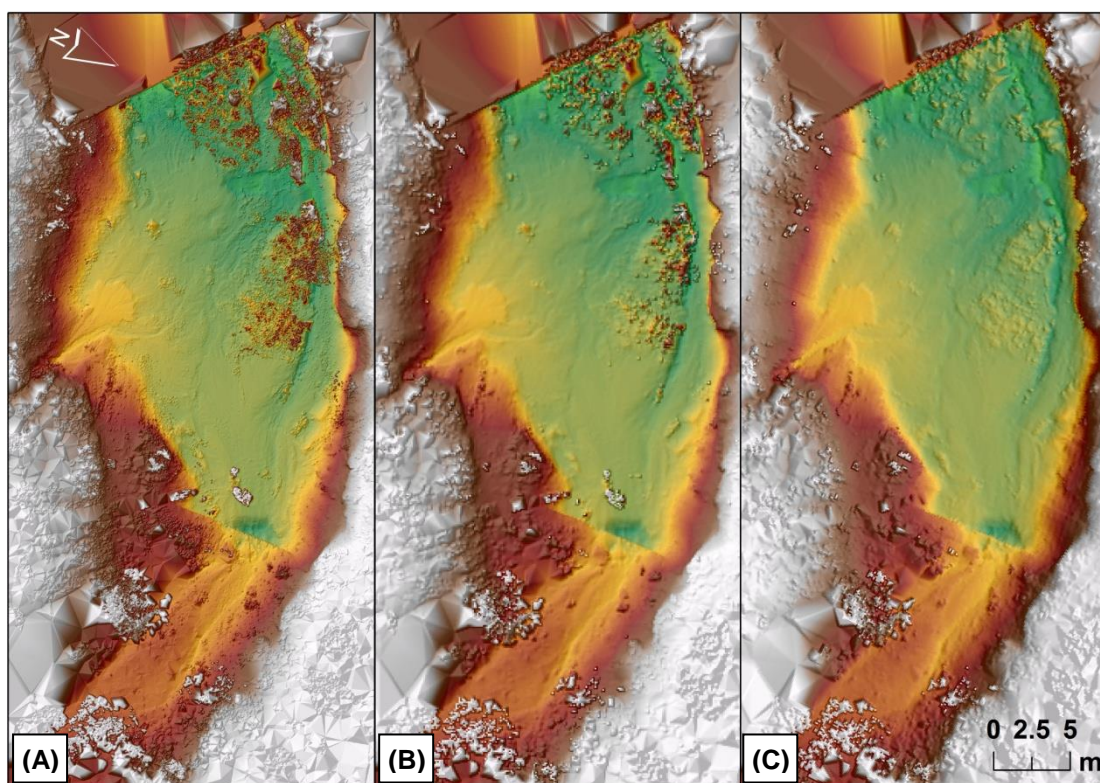


Figura 4.11: Modelos digitales de elevación del dique Z1 desarrollados a partir de las nubes de puntos tomadas por el láser escáner terrestre. (A) MDT de los puntos tomados por el láser sin filtrar con una resolución de píxel de 2 cm. (B) MDT de los puntos filtrados generalizando la cota mínima por píxel de resolución 10 cm. (C) MDT con borrado manual de los puntos de más de 10 cm de diferencia con los puntos más bajos colindantes e interpolando linealmente el valor en el punto. La resolución de este MDT es de 10 cm.

- **Técnica GPS:** La medición mediante sistemas de posicionamiento satelital permite la toma de datos respecto a una referencia global, con una precisión variable que depende de la técnica utilizada, las condiciones ambientales, la visibilidad de los satélites, la geometría satelital utilizada, las condiciones de la ionosfera y troposfera, y la calidad del

receptor GPS (Sardon et al., 1994; Bolstad et al., 2005). Las medidas tomadas con esta tecnología mediante antenas autónomas contienen errores máximos en su posición horizontal y vertical de alrededor de 10 m. Este error se reduce a errores de pocos centímetros si los datos se toman mediante un sistema de GPS diferencial (Brasington et al., 2000).

La medición de los diques de retención de sedimento utilizando la técnica de posicionamiento satelital se ha llevado a cabo utilizando un GPS diferencial modelo 4700 de la marca Trimble. La metodología utilizada para la caracterización de los diques, ha sido la de medidas cinemáticas en tiempo real (RTK) (Clark y Lee, 1998; Brasington et al., 2000). El método RTK consiste en la medida de la posición de una antena GPS móvil (*rover*) corregida en base a una antena de GPS estática (*base*) de coordenadas conocidas. La base registra su posición de forma continua, la corrige con respecto a su posición teórica y emite la corrección. La antena móvil detecta las señales de corrección de la base, y las aplica para compensar su propia posición. Estas correcciones reducen el error de métrico a centimétrico.

Puesto que la posición de la base de medidas se ha tomado directamente de las lecturas de la antena de forma autónoma, el error de posicionamiento global registrado por el GPS han sido de entre 2 y 10 m (en Z6 y Z10 respectivamente), aunque, como se ha comentado, los errores relativos máximos de los puntos de medida a la base han sido menores (1,5 cm en la horizontal y 2 cm en la vertical respectivamente) (Tabla 4.7). Estos errores son consistentes con los resultados de precisión de estas técnicas descritas en la bibliografía (Satalich y Ricketson, 1998; Brasington et al., 2000; Gan-Mor et al., 2007).

Dique	Puntos medidos	Puntos post-proceso	Error Horizontal	Error Vertical en el depósito	Error Vertical en la vegetación	% cobertura vegetal	Error Vertical total
Z1	2845746	125294	0.02 m	0.02 m	0.1 m	49.673	0.06 m
Z2	4718609	241162	0.015 m	0.05 m	0.2 m	7.477	0.06 m
Z3	2513358	77008	0.02 m	0.02 m	0.05 m	20.13	0.026 m
Z5	8197806	390338	0.05 m	0.05 m	0.1 m	12.098	0.056 m
Z6*	2951	2951	0.013 m	0.018 m	0	0	0.018 m
Z6b	4007916	841885	0.02 m	0.02 m	0.1 m	52.917	0.089 m
Z7	733430	105135	0.02 m	0.02 m	0.1 m	7.636	0.026 m
Z8	2156717	139524	0.01 m	0.01 m	0.1 m	15.371	0.024 m
Z9	4531368	186975	0.01 m	0.01 m	0.15 m	7.766	0.021 m
Z10*	1962	1962	0.015 m	0.02 m	0	0	0.02 m

Tabla 4.7: Número de puntos y errores derivados de la obtención y procesado de las medidas, en los diques de retención de sedimento. Los diques con asterisco son aquellos que se han medido mediante GPS diferencial, mientras que los demás se han medido mediante TLS. Puesto que la cobertura vegetal no afecta a las medidas de GPS, el error derivado de la vegetación en los diques medidos con esta técnica es 0.

Pese a no permitir una densidad de medidas comparable al TLS (Tabla 4.7), el GPS diferencial tiene una serie de ventajas frente a este: i) no se ve afectado por la presencia de agua en los diques, ii) permite tomar datos independientemente de la densidad de la vegetación (excepto en las proximidades de los árboles donde estos limitan la visibilidad satelital), iii) no requiere mucho post-proceso y iv) posiciona los puntos de medida en

una escala global con una precisión buena. Esta técnica de medición ha sido utilizada para los diques Z6 y Z10 que no han podido ser medidos mediante TLS.

- **Caracterización del sedimento:** En cada uno de los diques utilizados para el estudio, se han excavado un mínimo de dos zanjas paralelas entre si y al muro del dique. En estas zanjas se realiza una estratigrafía de detalle para determinar el número de eventos registrados durante las distintas avenidas desde la construcción de los diques, su espesor y las características físicas del sedimento transportado por cada una de ellas (Tabla 4.8). En todos los diques se han excavado varias zanjas para determinar si alguno de los niveles identificados se acuña y desaparece a lo largo del relleno sedimentario, tal y como sucede otras áreas de ambiente Mediterráneo (Bussi et al., 2013). Sin embargo, se ha determinado que en el presente estudio los niveles acumulados presentan continuidad lateral y no existen acuñamientos bruscos de los niveles.

El número de eventos representados en los rellenos de los diques y su espesor medio se ha obtenido mediante la descripción en las zanjas y el levantamiento de columnas estratigráficas, separadas un mínimo de un metro entre sí, hasta formar un panel donde se muestra la continuidad lateral de los contactos estratigráficos. Para evitar errores de cubicación derivados de la pérdida de datos en los márgenes laterales del depósito, la potencia media del sedimento aportado por evento se ha calculado como el cociente entre el área del sedimento expuesto en la zanja y su longitud.

Las características físicas del sedimento se han obtenido mediante análisis de laboratorio de muestras tomadas en campo y se exponen en la Tabla 4.8.

Muestra	Nº Eventos	potencia depósito (m)	Densidad aparente (g/cm ³)	% arena	% limo	% arcilla	% M.O	C.E. µS/cm
z1	5	2.01	1.211	82.936	16.763	1.718	0.814	105
z2	9	0.58	1.537	42.251	57.710	0.888	0.125	1969
z3	2	0.12	1.340	58.263	40.807	5.413	0.376	210
z5	3	0.29	1.102	69.654	29.344	3.431	0.797	185
z6	3	0.94	1.036	77.638	21.780	2.254	1.221	707
z6b	3	0.54	1.069	71.596	25.562	2.842	0.783	335
z7	4	0.43	1.136	71.663	27.449	3.013	0.282	193
z8	4	0.24	1.154	85.777	14.213	0.510	1.127	180
z9	4	0.30	1.245	79.273	20.192	2.841	0.344	140
z10	8	0.47	1.151	88.857	11.036	1.170	2.755	471

Tabla 4.8: Valores de los parámetros texturales y físico-químicos medidos en cada uno de los depósitos de sedimento de los distintos diques de retención. La densidad, las fracciones granulométricas, el contenido de materia orgánica y la conductividad eléctrica son el resultado de análisis de laboratorio, mientras que el número de eventos se basa en observaciones de campo. El espesor de los depósitos se ha calculado como la suma de los espesores medios de cada uno de los eventos calculados como el cociente entre el área expuesta y la longitud del estrato en las zanjas.

Los datos obtenidos en las zanjas conjuntamente con las medidas tomadas mediante TLS y GPS se han utilizado para calcular el volumen de sedimentos acumulados en cada uno de los diques y las tasas de generación de estos en sus cuencas.

- **Cálculo de volumen:** El volumen de sedimento retenido por cada uno de los diques de retención se ha calculado de dos formas distintas, y en dos tomas de medida separadas en el tiempo.

1) En primera instancia, el volumen de sedimento retenido en los diques se ha calculado utilizando como referencia la superficie del depósito sedimentario. A cada uno de los puntos de topografía medidos, se le ha restado la parte proporcional de cota en función de una geometría piramidal tal y como indica la Fórmula 4.2. Esta fórmula considera el espesor medio de los eventos identificados en la zanja más proximal al dique, acumulativamente de techo a base (Bussi et al., 2013).

$$h = \frac{H_2 * e}{H_1 * H_2 * (e + d) - d * H_1^2} \quad 4.2$$

Donde:

- h es la variación de cota en el punto de medida
- H_1 es la variación de cota hasta la base del evento en la zanja proximal al dique
- H_2 es la variación de cota hasta la base del evento en la zanja s distal al dique.
- e es la distancia entre las dos zanjas.
- d es la distancia del dique al punto.

La reducción progresiva hacia la cola del reservorio se calcula como la pérdida de espesor entre la primera y la segunda zanja, que define en su intersección con la superficie la longitud del reservorio (Fórmula 4.2). El volumen de cada evento se ha calculado comparando las nuevas superficies generadas con un plano de referencia a una cota fija. Los resultados de aplicar esta fórmula a los distintos diques se exponen en la Tabla 4.9.

Dique	Volumen sedimentos por evento (m³)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
z1	0.057	0.483	0.023	2.768	122.014				
z2	0.051	0.785	1.120	0.100	3.771	0.126	0.046	0.061	0.091
z3	0.007	0.259							
z5	5.080	10.545	7.296						
z6	46.503	105.397	6.262						
z6b	5.313	1.384	0.077						
z7	0.135	0.152	0.119	0.256					
z8	0.076	0.328	0.192	0.009					
z9	0.145	0.071	0.090	0.106					
z10	3.861	1.609	0.108	0.039	0.174	0.170	0.367	0.778	

Tabla 4.9: Número de eventos por dique y volumen de sedimento de cada uno de ellos calculado mediante la superficie de los depósitos y los espesores determinados en las zanjas.

La principal limitación de la técnica es que define una geometría rígida en la que se referencia todo el depósito a la morfología de la superficie actual, y se considera los incrementos de volumen como pirámides geométricas con una longitud de depósito fija. Por otro lado, su principal ventaja es que no requiere de información previa del vaso de acumulación del dique para estimar el volumen de sedimento retenido durante cada uno de los eventos de escorrentía.

- 2) El 28 de Septiembre de 2012 se registró el tercer mayor evento de avenida del registro instrumental. Dado que pocos meses antes se había realizado la primera campaña de medida topográfica en los diques, se procedió a realizar una nueva campaña de medida de TLS y GPS para estimar el volumen de sedimento acumulado durante este evento excepcional.

Los diques y sus reservorios han sido medidos con TLS a excepción del dique Z5 debido a su inundación por la obturación de sus desagües, el dique Z2 debido a la destrucción de la pista de acceso y el dique Z10 debido a la vegetación. Los levantamientos en estos tres diques han sido realizados mediante GPS diferencial.

Comparando las nuevas superficies del sedimento con las medidas previas, utilizando como referencia los diques, se ha podido determinar con gran precisión el volumen de sedimento transportado y acumulado durante el evento de Septiembre del 2012 (Tabla 4.10).

Dique	Volumen (m3)	Error (m3)	Erosión cuenca (t/Ha)	Error (t/Ha)
z1	-24.82	-1.48	-0.81	-0.0485
z2	77.93	7.66	0.50	0.0488
z3	9.54	0.25	0.25	0.0065
z5	1116.76	111.68	3.25	0.3247
z6	431.39	43.14	0.59	0.0595
z6b	193.40	17.17	0.27	0.0238
z7	100.63	2.63	1.48	0.0388
z8	150.767	3.60	3.95	0.0942
z9	362.80	7.57	12.55	0.2619
z10	153.97	3.08	0.18	0.0037

Tabla 4.10: Volumen calculado entre la dos superficies de alta resolución medidas en los diques de retención de sedimento (antes y después del evento de 2012).

La ventaja de esta metodología de comparación de superficies es que no sólo se puede determinar el volumen de sedimento transportado con errores inferiores al 10%, sino que también se puede analizar y describir las dinámicas sedimentarias y los cambios de morfología en el depósito (Figura 4.12). Su principal limitación es que requiere de una medida previa de referencia sobre la que poder comparar.

Pese a las precauciones tomadas con la elección de los diques, se ha observado en campo que los diques Z1 y Z2 han sido colmatados y sobrepasados por el sedimento, y los diques Z3, Z10 y Z7 han sufrido procesos de erosión e infiltración. Por este motivo el sedimento acumulado en los diques es inferior al total de sedimento que ha circulado por su cauce durante el evento.

En la Figura 4.12 los diques que han sido sobrepasados o erosionados, presentan pérdidas importantes de sedimento (excepto en el dique Z10 por la menor resolución de los datos. algunos diques incluso con acumulaciones negativas como se observa en la Tabla 4.10 para Z1) y canalizaciones en las zonas proximales al dique debido al aumento de velocidad del flujo. La presencia de este tipo de morfologías se debe tener en cuenta para detectar diques que pueden presentar problemas de eficiencia en la retención del sedimento.

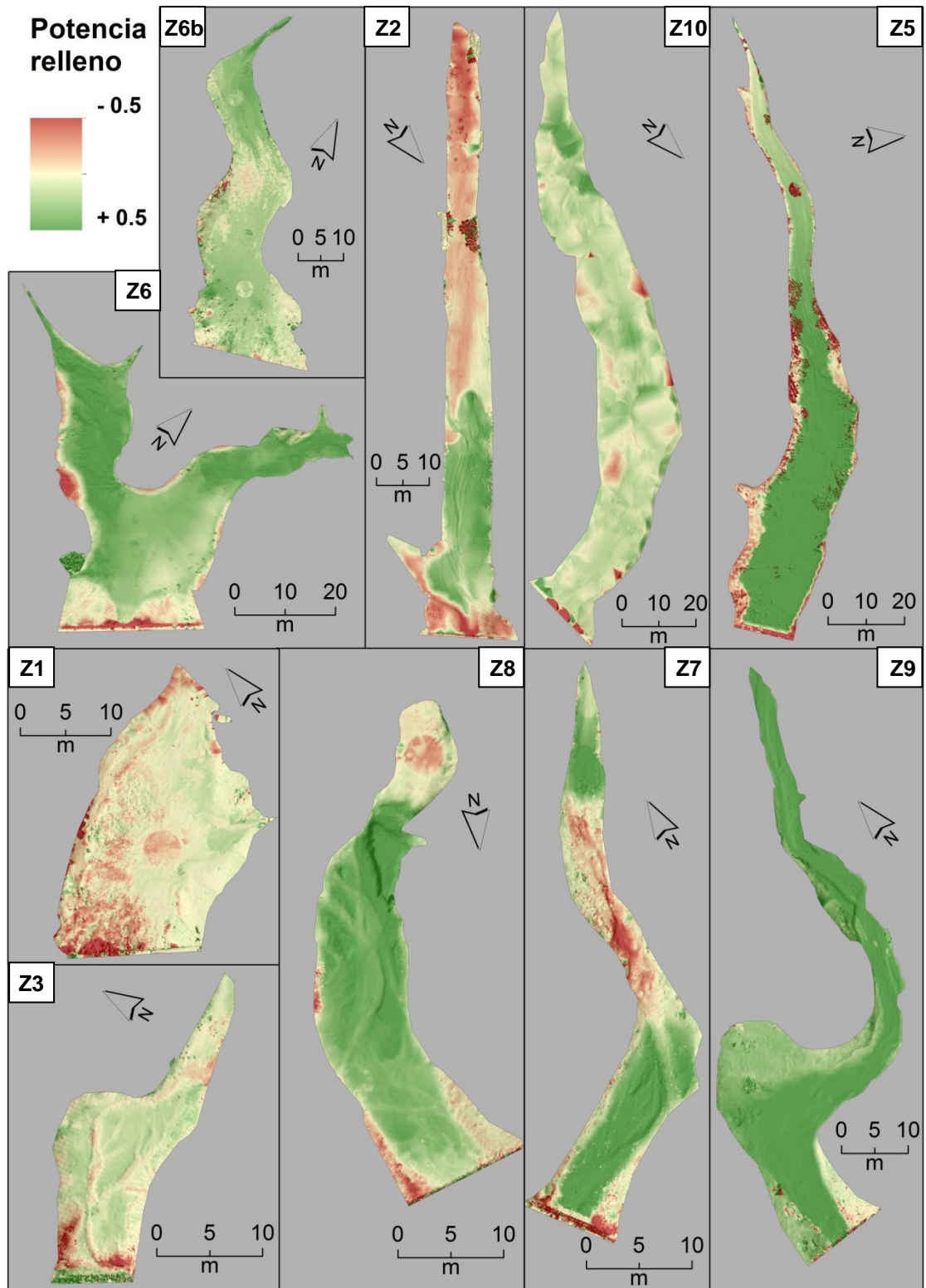


Figura 4.12: Mapas de las diferencias en los depósitos de sedimento antes y después de la avenida de Septiembre de 2012. El color amarillo indica zonas que no han variado entre las distintas tomas de datos, el color verde identifica acumulación de sedimento entre la primera y segunda medida y el color rojo indica erosión. Se observa la diferencia de precisión entre el dique Z10 y los demás diques ya que es el único dique en el que las dos tomas de datos se han adquirido con GPS.

- **Curvas de embalse:** Combinando el volumen de sedimento y la topografía de alta resolución, se ha estimado el volumen de la cubeta de cada uno de los diques en intervalos de medio metro. Esto ha permitido elaborar una ecuación de curva de embalse (altura-volumen) para cada uno de los diques seleccionados (Figura 4.13). Mediante las curvas de embalse se ha determinado la eficiencia de retención de los diques (Verstraeten y Poesen, 2001), que se encuentra alrededor del 60% (Tabla 4.11).

Dique	Volumen calculado m3	Eficiencia de retención según Brown	Aportación t / (Ha*año)
Z1	125.34	70%	1.519
Z2	6.15	36%	0.223
Z3	0.27	49%	0.004
Z5	22.92	70%	0.072
Z6	158.16	50%	0.237
Z6b	6.77	57%	0.016
Z7	0.66	62%	0.015
Z8	0.61	74%	0.044
Z9	0.41	87%	0.078
Z10	7.10	45%	0.002

Tabla 4.11: Características del depósito y aportación de sedimentos en cada dique, determinadas utilizando las ecuaciones de Brown (1943) y las curvas de Brune (1953) mediante las curvas de embalse.

Las curvas de embalse han permitido la parametrización necesaria para calcular el sedimento aportado a los diques y a la propia presa de Valdeinfierno gracias a la eficiencia de retención. Se ha considerado que la fiabilidad de las curvas es buena ya que, tal y como se observa en la Figura 4.13, la curva de su ecuación se acomoda con mucha precisión sobre los datos de volumen de cubeta calculados siguiendo la metodología de Bussi et al. (2013).

El único dique que no se adapta correctamente a la curva es el Z10, debido a que su cubeta es muy irregular y presenta un cambio de volumen muy abrupto a una altura entre 4 y 5 m. Sin embargo, hasta dicha altura la correlación entre la curva y los datos se puede considerar aceptable, por lo que en el estado de relleno actual se considera una buena aproximación. Se ha contrastado el resultado de las curvas con los incrementos de sedimentos determinados tras la avenida de Septiembre de 2012 dando un resultado aceptable (Tabla 4.10; Figura 4.13).

La información obtenida de los diques de retención y su sedimento se ha utilizado como parámetro del modelo (morfología de la cubeta) y como datos de calibración y validación de la producción de sedimento en cada uno de los eventos modelados, entendiendo que la máxima resolución de volumen obtenido corresponde al estimado para el evento de Septiembre de 2012.

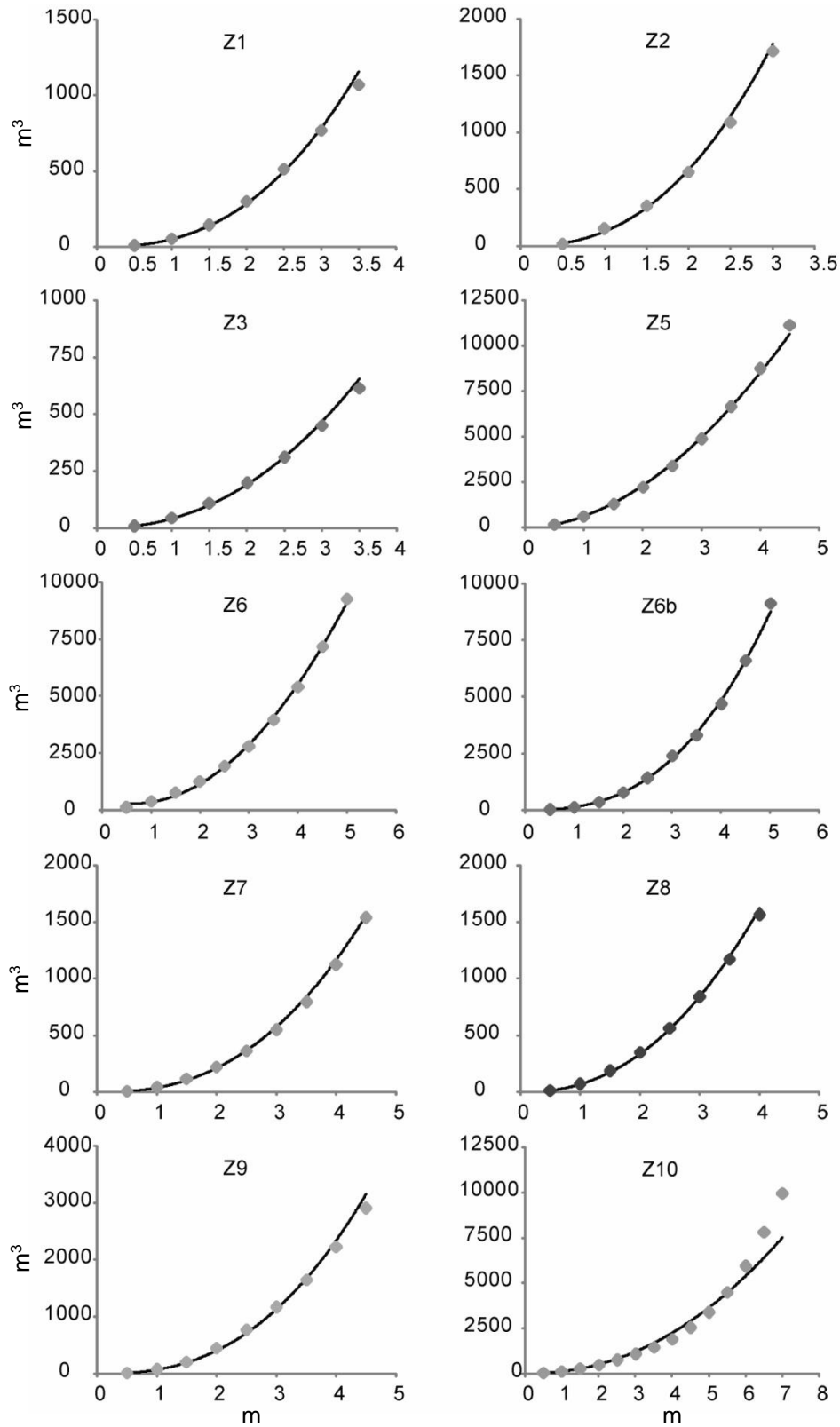


Figura 4.13: Curvas altura-volumen elaboradas para cada uno de los diques de retención de sedimento. El eje vertical corresponde al volumen de la cubeta, mientras que el eje horizontal corresponde a la altura de sedimento en el dique. Los puntos corresponden a los volúmenes calculados siguiendo la metodología de (Bussi et al., 2013). Las curvas corresponden a la ecuación potencial definida en cada uno de los diques.

La determinación del volumen de sedimento retenido por evento permite el cálculo de las distintas tasas de erosión producidas en las cuencas que desaguan a cada uno de los diques. Con esa finalidad se ha calculado (i) la erosión anual en la cuenca producida por los eventos de escorrentía generados entre la construcción de los diques y la primera medida de su superficie, (ii) la erosión producida por el evento de mayor magnitud sin considerar el último evento de Septiembre de 2009, (iii) la erosión producida por este único evento considerando las medidas de los depósitos anteriores y posteriores a él y la erosión anual producida por todos los eventos (Tabla 4.12).

Dique	Año construcción	Eficiencia dique	Máximo registro t/Ha	Último evento t/Ha	Tasa erosión 1 t/(ha*año)	Tasa erosión 2 t/(ha*año)	Estado actual
Z1	2001	0.7	5.705	-1.160	0.586	0.427	Colmatación
Z2	2009	0.36	0.067	1.381	0.054	0.497	Colmatación
Z3	2009	0.49	0.014	0.512	0.007	0.175	Pérdidas
Z5	2009	0.7	0.044	3.247	0.048	1.105	
Z6	2009	0.5	0.291	1.190	0.218	0.542	
Z6B	2009	0.57	0.013	0.470	0.008	0.162	
Z7	2009	0.62	0.006	2.395	0.008	0.803	Pérdidas
Z8	2009	0.74	0.012	5.343	0.011	1.788	
Z9	2009	0.87	0.006	14.422	0.008	4.813	
Z10	1976	0.45	0.010	0.406	0.001	0.012	Pérdidas

Tabla 4.12: Tasas de erosión calculadas mediante los datos de volumen de sedimento en las zanjas y la comparación entre superficies antes y después del último evento. La columna de máximo registro contempla el evento de máximo espesor en las zanjas sin considerar el último evento (septiembre de 2012). La tasa de erosión 1 corresponde a los datos de erosión anual antes último evento, mientras que la tasa de erosión 2 corresponde a los datos anuales después del evento. La columna "estado actual" indica los diques que han sufrido colmatación o pérdidas durante el último evento.

En la Tabla 4.12 se observa que las mayores tasas de erosión se dan para los eventos únicos de magnitud importante. En concreto, la máxima en todos los diques se dan en el último evento, con la excepción de Z1 donde se observa una pérdida de sedimento respecto a la primera medida. Cabe considerar que puesto que los diques Z1, Z2, Z3, Z7 y Z10 no han retenido todo el sedimento que ha circulado por su cauce durante el último evento, debido a su colmatación o a pérdidas de material por erosión, la tasa de erosión en sus cuencas necesariamente ha sido mayor a la que registra la acumulación en los diques.

Los resultados de tasas de erosión obtenidos en las cuencas indican que el transporte de sedimento se produce de forma irregular en el tiempo. Siendo el volumen movilizado durante eventos de magnitud moderada, muy superior a la erosión media anual de la cuenca. El transporte irregular también se identifica en el hecho de que la inclusión de un evento de gran magnitud, aumenta significativamente el valor de la tasa anual de erosión, incluso en diques antiguos y con problemas de retención como en el caso de Z10.

Debido a los problemas de colmatación y pérdidas en los diques, la calibración del módulo TETIS-SED se ha realizado considerando como fiables los datos de retención de los diques Z5, Z6, Z6b, Z8 y Z9, considerándose que en los demás diques la acumulación de sedimento tiene que ser necesariamente mayor que la medida.

4.2.4.3. *Sedimento retenido en la presa de Valdeinfierno*

La presa de Valdeinfierno ha registrado desde su construcción una elevada acumulación de sedimentos (Musso y Fontés, 1847; Sáinz, 1897). Por ello, el CEDEX, por encargo de la Dirección General de Obras Hidráulicas, ha realizado desde 1976 tres reconocimientos batimétricos (CEDEX, 1976, 1984, 1995a) y un reconocimiento sedimentológico (CEDEX, 1995b). En cada uno de estos trabajos se ha medido su capacidad de almacenaje, se ha actualizado la curva de embalse de la presa, y se ha determinado la densidad de los sedimentos acumulados hasta la fecha y la degradación específica (erosión) de la cuenca (Tabla 4.13). Para el primer periodo, cabe destacar que el CEDEX toma como referencia de volumen de embalse el año de terminación del primer recrecimiento de la presa (1897), no el de construcción (1806).

Según el estudio sedimentológico de 1995, la eficiencia de retención calculada con la ecuación de Brown (1943) es 95.2%. La eficiencia de los diques se ha calculado utilizando también las curvas de Brune (1953), por lo que se ha procedido a determinar la eficiencia de la presa de Valdeinfierno con la misma metodología. Para ello se ha calculado la media anual de caudal de entrada al embalse desde 1976 hasta 1995 a partir de los datos del CEDEX y del SAIH, cuyo valor es de 3.024 Hm³, y que se ha considerado como pérdida de capacidad del embalse en este periodo. Aplicando estos valores a las curvas de Brune (1953) y calculando la retención de sedimento según Brown (1943), se han obtenido valores de eficiencia de retención mínima absoluta del 94% y máxima del 100%. Estos valores permiten considerar que la eficiencia de retención media está comprendida entre el 95 y el 98%. Estos resultados son consistentes con la eficiencia calculada por el CEDEX, aunque algo mayores (Tabla 4.13).

Año	Capacidad Hm ³	Sedimentación Hm ³	Aporte t/ (Ha*año)	Densidad T/m ³	Eficiencia mínima	Eficiencia media	Eficiencia máxima
1897	25.000				96%	98%	100%
1976	14.190	10.810	3.19	1*	95%	98%	100%
1984	12.653	1.537	4.40	1.038	95%	98%	100%
1995	11.149	1.504	3.10	1.032	94%	97%	100%

Tabla 4.13: Datos relevantes para el estudio extraídos de los distintos informes del CEDEX correspondientes al embalse de Valdeinfierno, a los que se ha incluido el cálculo de la eficiencia de retención de la presa en base a la ecuación de Brown (1943) mediante las curvas de Brune (1953). La sedimentación y el aporte medio de la cuenca, así como las eficiencias de retención han sido calculados respecto al estudio anterior. Por lo tanto, el único estudio que considera la puesta en servicio del dique para los cálculos es el de 1976. El cálculo del aporte se ha considerado igual a 1 puesto que en el estudio de 1976 no se calcula la densidad de los sedimentos retenidos en el embalse.

Los valores de entrada anual de la Tabla 4.13 representan aportes relativamente elevados para cuencas del tamaño de Valdeinfierno, por lo que se puede considerar una zona con marcada predisposición a la erosión (Romero-Díaz et al., 2011) y con buena conectividad gracias a valores acumulados durante el periodo comprendido entre la toma de datos. Por tanto, en el caso de periodos largos que contengan años de escasa precipitación, los aportes medios anuales

son relativamente bajos. Por ejemplo, durante el periodo 1897-1976 (79 años) se obtiene una producción de sedimento baja (Tabla 4.13) pese a contener la mayor avenida registrada en periodo instrumental en el año 1973 (Capel Molina, 1974; Benito et al., 2010). Sin embargo, la aportación anual que el período 1976-1984 (8 años), es mayor (Tabla 4.13) a pesar de que la mayor avenida en este periodo generó un 23% del volumen registrado durante el evento de 1973 (según los datos del CEDEX, la avenida de 1973 aportó 245.6 m³/s en 24h al embalse mientras que la segunda, de 1977 aportó 56.6 m³/s en 24h).

La información relativa a la sedimentación en la presa de Valdeinfierno se ha utilizado para complementar los datos de transporte de sedimentos medidos en los diques de retención y validar el transporte en la cuenca simulado por el módulo TETIS-SED.

4.2.4.4. Implementación de los diques en el modelo.

Como se ha comentado en el apartado anterior, los diques de retención de sedimento y los sedimentos acumulados en la presa de Valdeinfierno, determinados mediante la pérdida de volumen del embalse, se han utilizado con dos objetivos principales. El primer objetivo ha sido obtener los parámetros necesarios para determinar el comportamiento sedimentario en la cuenca utilizando el módulo TETIS-SED. El segundo, ha sido el de obtener un volumen total de sedimentos acumulado en un periodo de tiempo conocido para poder calibrar y validar el transporte producido por las avenidas simuladas.

Intervalo	Año inicio	Año fin	Usos Suelo
1	1971	1976	1956
2	1976	1984	1976
3	1984	1995	1990
4	1995	2001	2000
5	2001	2009	2006
6	2009	2012	2006
7	2011	2012	2006

Tabla 4.14: Intervalos temporales utilizados para las distintas simulaciones del módulo TETIS-SED. Estos intervalos se adaptan o bien a los años de construcción de alguno de los diques de retención de sedimento o bien a una medición batimétrica del embalse de Valdeinfierno. Nótese que el intervalo 7 se solapa con el intervalo 6, ya que el intervalo 7 contempla el periodo transcurrido entre las dos mediciones de detalle de la superficie de los depósitos de los diques.

Para poder estimar el comportamiento de los diques desde su construcción hasta la actualidad, ha sido necesario subdividir las simulaciones y los datos instrumentales de precipitación y caudal en función de las fechas de construcción de los diques y de las mediciones batimétricas en la presa de Valdeinfierno. Esta subdivisión de los datos en el tiempo ha permitido considerar los cambios en los distintos usos del suelo expuestos en la Figura 4.3, utilizando los más próximos o contenidos en los intervalos temporales moderados (Tabla 4.14).

A continuación se exponen los parámetros necesarios para la simulación del transporte de sedimento mediante el módulo TETIS-SED:

- **Características del atrapamiento:** En el modelo las características del atrapamiento se expresan como las propiedades físicas del dique y su depósito. Estas consisten en la posición espacial del dique en los ejes X e Y, su altura respecto la base, su longitud (de hombro a hombro), la pendiente local del cauce y la densidad aparente de los sedimentos del depósito.

La posición espacial de los diques ha tenido que ser modificada ya que, para el correcto funcionamiento del modelo, es necesario que los puntos de control de sedimentación se encuentren en el centro de una de las celdas del MDT (de 100 m de lado). Por este motivo se ha considerado cada uno de los diques en el centro de la celda que compone la salida de su red de drenaje. En todos los casos dicha celda ha coincidido con la que contenía el dique. Esta generalización ha supuesto un problema de ubicación entre los diques Z6 y Z6b ya que ambos diques coinciden en la misma celda. Dado que se encuentran próximos y en el mismo cauce. A efectos de simulación, este conflicto se ha resuelto considerando únicamente el dique Z6b (situado aguas abajo) y asignándole el volumen de sedimento medido como la suma de su volumen con el de Z6.

- **Curvas de embalse:** El modelo determina la capacidad de almacenamiento de los diques y sus incrementos de sedimentación mediante la curva de embalse. Por ello se ha introducido este parámetro para cada uno de los diques a incrementos regulares de medio metro de altura.
- **Estado inicial y final de los diques:** El estado inicial de los atrapamientos se define en el modelo como la cota total del dique disponible previamente a la simulación. Los datos de volumen calculados difieren ligeramente entre los que se han estimado mediante los espesores de la estratigrafía de las zanjas junto con las medidas de superficie de alta resolución, y los que se han estimado mediante los datos de volumen de las curvas de embalse para la potencia de sedimentos actual. Para evitar en medida de lo posible la acumulación de errores se ha utilizado como dato de entrada la cota de acumulación de sedimento, equivalente al volumen medido en campo, calculada utilizando la curva de embalse.

Los diques presentes en más de un periodo de simulación, como Z1 y Z10, toman el estado final de la simulación anterior como estado inicial de la siguiente.

Estos parámetros son necesarios para obtener un control espacial de las simulaciones y poder aproximar los resultados al comportamiento real de la cuenca. Este comportamiento se ha definido utilizando como evidencia de transporte los sedimentos medidos en los diques y en la presa en distintos intervalos espaciales y temporales conocidos, que se han utilizado en distintas escalas y en distintos periodos para la calibración y validación del módulo TETIS-SED.

4.2.5. Calibraciones del modelo TETIS y el módulo TETIS-SED

La calibración del modelo se debe orientar inicialmente los componentes y parámetros hidrológicos (TETIS) y en una segunda aproximación a los sedimentológicos (TETIS-SED), ya que la simulación del transporte sedimentario es dependiente de la hidrología.

La discusión sobre la fiabilidad del resultado de las simulaciones hidrológicas, se ha basado en el coeficiente de eficiencia de Nash Sutcliffe (índice NS) para modelos de aproximación hidrológica en cauces (Nash y Sutcliffe, 1970). Este índice de eficiencia se calcula mediante la ecuación 4.3.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad 4.3$$

Donde:

- NS es el índice de Nash Sutcliffe.
- O_i son los valores de referencia o observados para cada intervalo i
- P_i son los valores simulados por el modelo para cada intervalo i
- \bar{O} es la media de los valores observados.

El índice NS ha sido utilizado extensamente en la literatura para calibrar y validar diversos modelos hidrológicos (Moriasi et al., 2007). El valor máximo que puede alcanzar es $NS=1$, cuando el flujo simulado es idéntico al observado (Nash y Sutcliffe, 1970), mientras que valores negativos indican que la simulación es menos representativa que la media aritmética de los datos (Arnold y Allen, 1999). El valor a partir del cual se puede considerar que la simulación de un modelo es eficiente con respecto a los datos de observación varía en función del modelo utilizado tal y como se indica en la Tabla 4.15.

En el modelo TETIS se puede considerar que la simulación es aceptable para valores mayores a 0.6 (Velez et al., 2009; Coccia y Todini, 2011), lo que es coherente con los rangos de valores del parámetro aceptables para otros modelos (Moriasi et al., 2007).

En el presente estudio se ha buscado afinar la calibración de la cuenca de Valdeinfierno con la mayor variabilidad espacial y temporal posible. Por este motivo se ha calibrado y validado el modelo a distintas escalas espacio-temporales cuando esto ha sido posible. En el caso de la simulación hidrológica, los únicos datos de caudal disponibles son los niveles en el embalse de Valdeinfierno por lo que no se ha podido calibrar y validar a distintas escalas espaciales. No obstante, los distintos intervalos de simulación han permitido la calibración a distintas escalas temporales. En el caso del transporte de sedimentos, ha sido posible simular a distinta resolución espacial, debido a que se han considerado los datos de acumulación de sedimento en la presa y en los diques de retención distribuidos por la cuenca.

Modelo	Valor	valoración	fase de modelización	Referencia
HSPF	> 0.80	Satisfactoria	Calibración y validación	(Donigian et al., 1983)
APEX	> 0.40	Satisfactoria	Calibración y validación	(Ramanarayanan et al., 1997)
SAC-SMA	< 0.70	Pobre	Auto calibración	(Gupta et al., 1999)
SAC-SMA	> 0.80	Eficiente	Auto calibración	(Gupta et al., 1999)
DHM	> 0.75	Buena	Calibración y validación	(Motovilov et al., 1999).[a]
DHM	0.36 a 0.75	Satisfactoria	Calibración y validación	(Motovilov et al., 1999).[a]
DHM	< 0.36	Deficiente	Calibración y validación	(Motovilov et al., 1999).[a]
SWAT	> 0.65	Muy buena	Calibración y validación	(Saleh et al., 2000)
SWAT	0.54 a 0.65	Adecuada	Calibración y validación	(Saleh et al., 2000)
SWAT	> 0.50	Satisfactoria	Calibración y validación	(Santhi et al., 2001).[b]
SWAT, HSPF	> 0.65	Satisfactoria	Calibración y validación	(Singh et al., 2005).[c]
TETIS	> 0.6	Satisfactoria	Calibración y validación	(Velez et al., 2009; Coccia y Todini, 2011)

Tabla modificada de Moriasi et al.(2007). [a] adaptado por Van Liew et al. (2003) y Fernandez et al.(2005); [b] adaptado por Bracmort et al.(2006); [c] adaptado por Narasimhan et al.(2005).

Tabla 4.15: Valores de los límites aceptables del índice de Nash Sutcliffe de múltiples simulaciones hidrológicas utilizando distintos modelos, disponibles en la literatura.

La simulación de todo el periodo instrumental se ha desarrollado utilizando los intervalos temporales indicados en el apartado 4.1.4.4, de los que se dispone información de transporte de sedimentos y de caudal.

4.2.5.1. *Calibración de modelo hidrológico*

La información de partida para la calibración de modelo hidrológico comprende los datos de variaciones de volumen y caudales de salida de la presa, utilizando datos del CEDEX y del SAIH. Estos caudales se han empleado junto con los datos meteorológicos de la AEMET, para los periodos de modelización determinados por la construcción de los diques de retención en la cuenca y las batimetrías en el embalse, tal y como se ha expuesto en el apartado 4.1.4. Estas series de datos han permitido la determinación de las características de cada uno de los intervalos de simulación considerados, tal y como se indica en la Tabla 4.16.

Periodo	Nº años	V obs (Hm³)	V obs /año (Hm³)	Nº días Q	Días Q /año	Nº días P	Días P /año	Q max obs (m³/s)
1971-76 (1)	5	35.6	7.1	179	35.8	415	83.0	245.60
1976-84 (2)	8	21.3	2.7	139	17.4	476	59.5	56.60
1984-95 (3)	11	33.3	3.0	193	17.5	785	71.4	43.06
1995-01 (4)	6	9.9	1.6	268	44.7	653	108.8	35.43
2001-09 (5)	8	13.0	1.6	172	21.5	905	113.1	12.81
2009-12 (6)	3	11.3	3.8	165	55.0	322	107.3	52.31
2011-12 (7)	1.25	6.2	5.0	19	15.2	105	84	52.31
1971-2012	41	124.3	3.0	1116	27.2	3556	86.7	245.60

Tabla 4.16: Valores de caudal (Q) volumen de agua acumulado en el en el embalse (V) y precipitación (P) en la cuenca de Valdeinfierno en los distintos periodos de simulación.

La elección del periodo de calibración del modelo TETIS y TETIS-SED se ha basado en dos premisas principales. (1) Se debe seleccionar el intervalo más representativo posible del comportamiento de la cuenca. (2) Se debe disponer de información del sedimento total transportado a lo largo del intervalo (para poder determinar el efecto hidrológico sobre los sedimentos). Estos condicionantes han llevado a la elección como periodo de referencia para la calibración un intervalo con una duración larga y del que se dispusiera de medidas batimétricas del embalse al inicio y final, así como al menos un evento con un pico de caudal de magnitud

importante. La presencia de los eventos extremos en la serie de calibración ha mostrado ser muy determinante, presentando una elevada influencia sobre procesos hidrológicos y sedimentológicos en la cuenca (Armas, 1996, 1998; Benito et al., 2010).

De la serie disponible, el periodo en el que se dan estas dos condiciones es el periodo comprendido entre 1976 y 1984 (periodo 2). Este periodo se encuentra entre la primera y segunda batimetría en Valdeinfierno, contiene el segundo pico de precipitación mayor de la serie instrumental (1977; 56.6m³/s en 24h) y su duración (8 años) es la segunda mayor en longitud de registro (Tabla 4.16).

Los parámetros sobre los que se efectúa la calibración se presentan en la Tabla 4.17.

Factor	Parámetro
FC1	Almacenamiento estático
FC2	Evapotranspiración
FC3	Infiltración
FC4	Escorrentía directa
FC5	Percolación
FC6	Interflujo
FC7	Pérdidas
FC8	Flujo de base
FC9	Velocidad de flujo

Tabla 4.17: Parámetros de corrección hidrológica considerados en la calibración automática SCE-UA (Duan et al., 1992), modificado por (Sorooshian et al., 1993) e incorporada al modelo TETIS (Frances et al., 2007), para su calibración respecto a un periodo de simulación.

La calibración del modelo se ha elaborado en dos fases, utilizando inicialmente una aproximación manual, optimizada posteriormente mediante la calibración automática SCE-UA (Duan et al., 1992, modificado por Sorooshian et al. 1993), y que se incluye en el propio modelo TETIS (Francés et al., 2007). Los resultados de la simulación óptima para el periodo de calibración se exponen en la Figura 4.14. Esta simulación presenta un índice NS de 0.665 respecto a los datos de caudal calculados a partir de la acumulación en Valdeinfierno, que según la escala de valores del parámetro NS expuesta en la Tabla 4.15 supone una fiabilidad satisfactoria.

La falta de datos de caudal en puntos de la cuenca distintos al embalse, no ha permitido validar la hidrología en las distintas sub-cuencas. No obstante, ha sido posible su validación a distinta escala temporal puesto que se dispone de datos de caudal continuos. Con este fin se ha optado por el periodo de menor duración de los que se dispone de datos de transporte de sedimentos. El intervalo que cumple con los condicionantes impuestos, es el periodo 7 (Septiembre de 2011 y Diciembre de 2012; 15 meses), ya que supone el periodo de simulación con datos de sedimentación más corto de toda la serie e incluye un pico importante de precipitación (Figura 4.15).

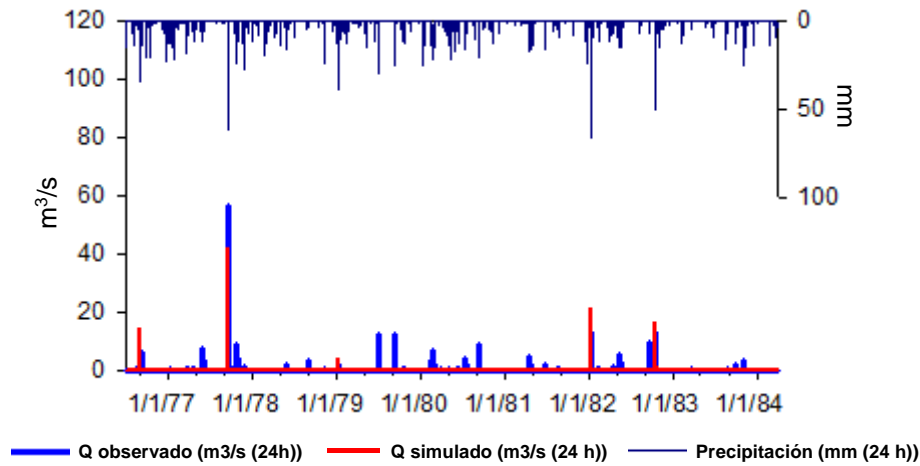


Figura 4.14: Hidrograma del caudal de simulación calculado en la cuenca de Valdeinfierno frente al caudal observado (eje inferior) y el hietograma de precipitación en la cuenca (eje superior), para el periodo de calibración hidrológica (periodo 2 de 1976 a 1984).

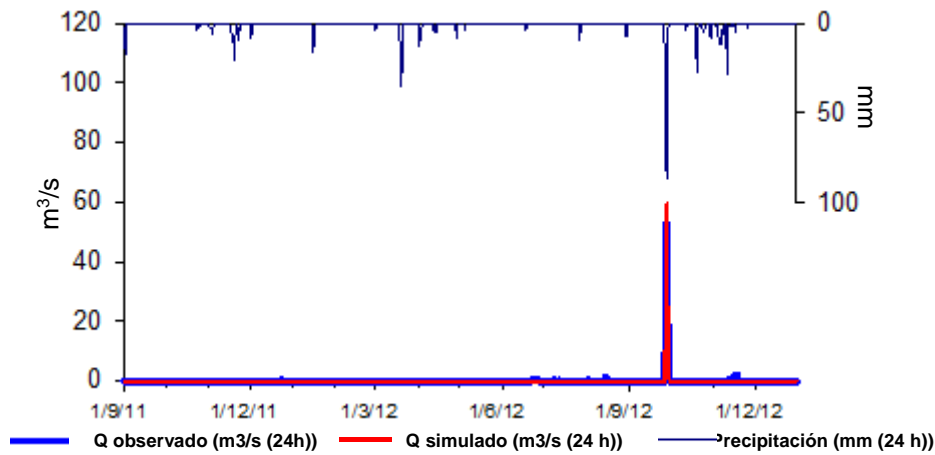


Figura 4.15: Hidrograma del caudal de simulación calculado en la cuenca de Valdeinfierno frente al caudal observado (eje inferior) y el hietograma de precipitación en la cuenca (eje superior), utilizando los parámetros de calibración hidrológica del periodo 2, (de 1976 a 1984), para el periodo de validación (periodo 7 del 9 de 2011 al 12 de 2012)

Los resultados de la simulación óptima para el periodo de calibración se han validado para el periodo 7 con un índice NS de 0.967, que según las escalas presentadas en la Tabla 4.15, supone una fiabilidad excelente.

4.2.5.2. *Calibración de modelo de producción de sedimento*

La calibración de la producción de sedimentos se ha basado en los registros de sedimento acumulados en los diques de retención de sedimentos construidos en la cuenca y las batimetrías efectuadas en la presa de Valdeinfierno en distintos periodos. Dichas batimetrías, han servido a su vez para definir los periodos de simulación. Se ha optado por esta metodología debido a que se ha considerado más fiable la información del volumen de sedimentos retenido en los diques y

en la presa durante los periodos de simulación, que los volúmenes de sedimentos calculados en las zanjas utilizados para la determinación de las curvas de embalse de los diques (Figura 4.13).

En la calibración del transporte de sedimentos se ha utilizado nuevamente el parámetro de fiabilidad de Nash-Sutcliffe (1970). En su origen, este parámetro está definido para flujos de agua en cauces. No obstante, en distintos trabajos ha sido aplicado conjuntamente con otros parámetros de eficiencia para la determinación de la fiabilidad de modelos de simulación de sedimentos (Saleh et al., 2000; Santhi et al., 2001; Engelmann et al., 2002; Saleh y Du, 2004; Bracmort et al., 2006; Moriasi et al., 2007).

Actualmente, el modelo TETIS-SED carece de la herramienta de calibración automática SCE-UA para la simulación sedimentológica. Este motivo ha llevado a considerar un segundo elemento de control de fiabilidad al modelo para calcular su desviación.

Se ha compensado la falta de calibración automática calculando el parámetro de desviación Pbias (Sorooshian et al., 1993; Yapo et al., 1996). Este parámetro se expresa como porcentaje y mide la tendencia diaria media de los datos simulados a ser mayores o menores que el dato observado. Su valor óptimo es 0 y puede ser tanto positivo como negativo (Gupta et al., 1999). Dicho índice de desviación se calcula mediante la ecuación 4.4.

$$Pbias = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} * 100 \quad 4.4$$

Donde:

- Pbias es el índice de desviación o sesgo (%)
- O_i son los valores de referencia o observados
- P_i son los valores simulados por el modelo

Los valores mínimos a partir de los cuales se considera un modelo eficiente varía en función de la desviación de este con respecto a los datos de observación y en relación con el modelo utilizado tal y como se indica en la Tabla 4.18

Modelo	Valor	valoración	fase de modelización	Referencia
HSPF	< 10%	Muy buena	Calibración y validación	(Donigian et al., 1983).[a]
HSPF	10-15%	Buena	Calibración y validación	(Donigian et al., 1983).[a]
HSPF	15-25%	Aceptable	Calibración y validación	(Donigian et al., 1983).[a]
SWAT	< 15%	Satisfactoria	Calibración de flujo	(Santhi et al., 2001)
SWAT	< 20%	Satisfactoria	Para sedimentos tras calibración de flujo	(Santhi et al., 2001)
SWAT	< 25%	Satisfactoria	Para nitrógeno tras calibración de flujo	(Santhi et al., 2001)
SWAT	20%	Satisfactoria	Calibración y validación	(Bracmort et al., 2006)
SWAT	< 10%	Muy buena	Calibración y validación	(Van Liew et al., 2003)
SWAT	10-15%	buena	Calibración y validación	(Van Liew et al., 2003)
SWAT	15-25%	Satisfactoria	Calibración y validación	(Van Liew et al., 2003)
SWAT	> 25%	Deficiente	Calibración y validación	(Van Liew et al., 2003)

Tabla extraída de Moriasi et al.(2007). [a] adaptado por Van Liew et al.(2003) y Shingh et al.(2005).

Tabla 4.18: Valores de los límites aceptables del índice de desviación Pbias de distintas simulaciones hidrológicas utilizando distintos modelos, disponibles en la literatura.

Los valores expuestos en la Tabla 4.18 relativos al parámetro Pbias presentan dos problemas. En primer lugar, en la bibliografía no hay constancia de los rangos aceptables de valores de Pbias para TETIS, por lo que el modelo no consta entre los analizados. El segundo problema es que los valores del parámetro son referentes a caudal de agua en cauce, no al flujo de sedimentos. En

relación al primer punto, se puede argumentar que, puesto que los datos del índice NS para el modelo TETIS se encuentran en el mismo rango que los otros modelos analizados tal y como se ha indicado en la Tabla 4.15, es razonable pensar que esta relación se mantiene en el parámetro de desviación Pbias. Respecto a los resultados del parámetro en el transporte de sedimentos frente a los de caudal, su relación ha sido discutida por Moriasi et al. (2007), obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 4.19.

Rendimiento	Pbias caudal	Pbias sedimento
Muy bueno	$< \pm 10$	$< \pm 15$
Bueno	$< \pm 15$	$< \pm 30$
Satisfactorio	$< \pm 25$	$< \pm 55$
Deficiente	$> \pm 25$	$> \pm 55$

Tabla modificada de Moriasi et al.(2007).

Tabla 4.19: Valores de los límites de rendimiento del índice de desviación Pbias para el caudal y transporte de sedimentos.

Nótese que en la Tabla 4.19, no se hace distinción entre modelos concretos, entendiéndose que en Moriasi et al. (2007) los resultados se consideran válidos para cualquier modelo hidrológico, incluyendo el TETIS.

La selección del periodo de calibración del módulo de sedimentos TETIS-SED ha estado condicionado por las dos medidas de alta resolución realizadas en los diques de retención, considerándose que el intervalo óptimo para la calibración sedimentológica de la cuenca es el periodo 7 (2011-2012). La elección del periodo 7 como intervalo de calibración permite considerar la calibración y la validación a distinta escala espacial y temporal. Esta diferenciación es posible debido a que el intervalo 7 contiene datos del aporte de sedimento a las presas de retención mientras que todos los demás periodos contienen únicamente información del aporte de sedimentos al embalse de Valdeinfierno. Los diques de retención utilizados para la calibración han sido Z5, Z6, Z6b, Z8 y Z9, debido a que estos diques no han sufrido daños estructurales durante la avenida de Septiembre de 2012 y presentan una aceptable distribución espacial en la cuenca.

La calibración del modelo se ha efectuado de forma similar a la hidrológica. Debido al estado de desarrollo experimental del modulo de sedimentos, la calibración automática SCE-UA aún no está implementada en TETIS-SED. Este motivo ha llevado a calibrar el transporte de sedimentos mediante una aproximación iterativa manual hasta el cuarto decimal, de forma parecida a la aplicada por (Baartman et al., 2013). No se ha iterado a mayor número de decimales, puesto que para precisiones mayores los parámetros NS y Pbias no presentan cambios significativos (variaciones por debajo del sexto decimal). Los parámetros considerados para la calibración manual optimizada se presentan en la Tabla 4.20.

Los resultados de la simulación óptima para el periodo de calibración en cada uno de los diques considerados se presentan en la Tabla 4.21.

Factor	Parámetro
Fcsed-1	Erosión en ladera
Fcsed-2	Transporte de sedimentos en cárcavas
Fcsed-3	Transporte de sedimentos en cauces

Tabla 4.20: Parámetros de corrección sedimentológica calibrados en el modelo TETIS para su calibración respecto al periodo de simulación 7 que corresponde al intervalo entre Septiembre de 2011 y Diciembre de 2012.

Dique	Volumen simulado(m³)	Volumen medido(m³)
z5	1520.7222	1116.75782
z6+z6b	585.9224	624.787178
z8	225.9225	150.760957
z9	287.6349	362.798053
z8+z9	513.5574	513.55901

Tabla 4.21: Volúmenes observados y simulados en los diques de retención de sedimentos para la calibración en el periodo de simulación 7 que corresponde al intervalo entre Septiembre de 2011 y Diciembre de 2012.

Los valores de los índices de fiabilidad para la calibración han sido de 0.669 para el índice NS y de -13.175 para el parámetro de desviación Pbias. Según lo presentado en la Tabla 4.15 y en la Tabla 4.19 estos índices muestran unos resultados para la simulación sedimentológica que se pueden calificar de satisfactorio y muy bueno, respectivamente. Aunque para la calibración se han considerado los diques de retención de sedimento, el modelo simula a todas las escalas, lo que permite comparar los resultados de la simulación hidrológica y sedimentológica a nivel de cuenca, tal y como se expone en la Figura 4.16.

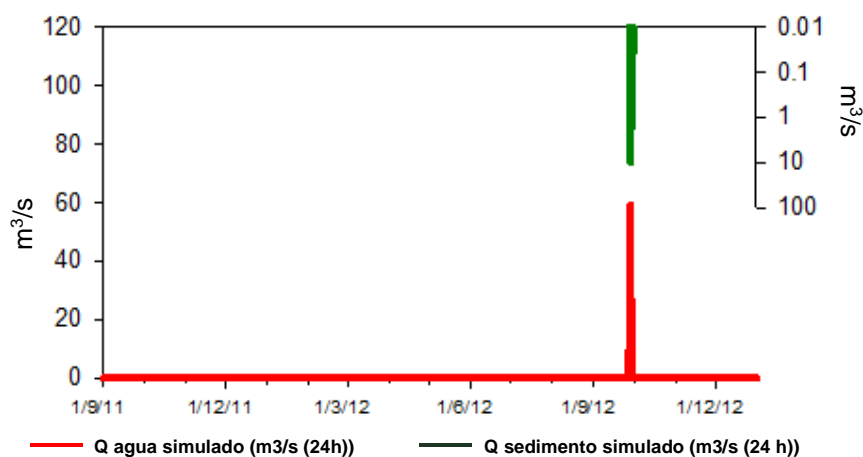


Figura 4.16: Caudal de sedimento simulado en la cuenca de Valdeinfierno (eje superior), frente caudal de agua simulado (eje inferior), para el periodo de calibración sedimentológica (periodo 7, del 9 de 2011 al 12 de 2012).

Los datos utilizados para la modelización sedimentológica permiten un contexto de validación a mayor escala espacial y temporal que la calibración, utilizando como dato el sedimento acumulado en el embalse. Con este objetivo se ha utilizado como periodo de validación el primer intervalo entre batimetrías de Valdeinfierno de ocho años de duración (periodo 2: 1976-1984), ya que comprende el periodo continuo más largo entre medidas batimétricas del embalse. La correcta validación en el periodo 2 constata la efectividad de la calibración del

modelo a escala anual sobre la simulación en periodos de tiempo cercano a la década, dando una mayor robustez a las estimaciones de producción de sedimentos a escalas mayores.

Los resultados de la simulación para la validación (Figura 4.17) muestran una buena correlación entre el caudal y el flujo de sedimento simulado. Como ha sido indicado, el sedimento retenido es un valor discreto que corresponde al total de acumulación en el embalse de Valdeinfierno durante todo el periodo de simulación. Por ello, aunque se observe una buena correlación ente picos, se hace necesario analizar la eficiencia del modelo en función de este valor.

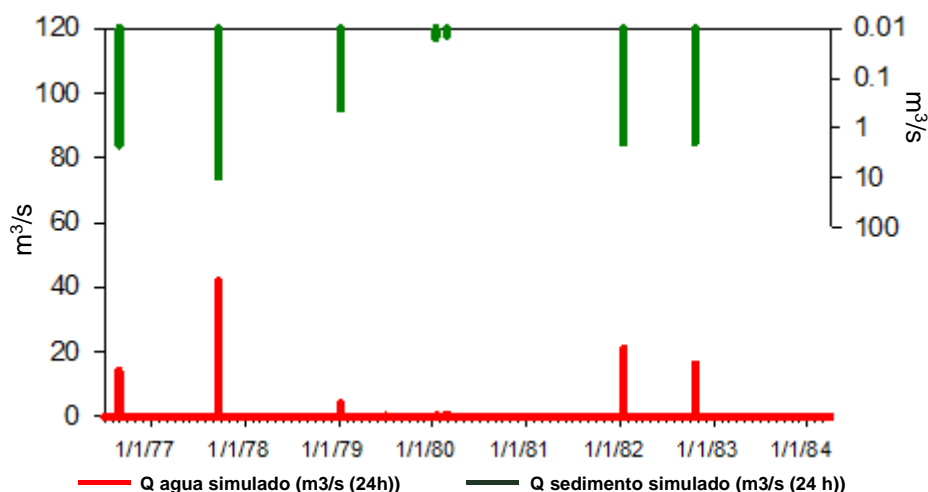


Figura 4.17: Caudal de sedimento calculado en la cuenca de Valdeinfierno (eje superior), frente caudal de agua simulado (eje inferior), utilizando los parámetros de calibración sedimentológica del periodo 7, (del 9 de 2011 al 12 de 2012), para el periodo de validación (periodo 2 de 1976 a 1984)

El resultado del volumen de sedimento acumulado en el embalse de Valdeinfierno durante el periodo de validación (periodo 2: 1976-1984) utilizando los parámetros de calibración (periodo 7: 2011-2012) tiene un valor de 1.58 Hm^3 , frente al volumen medido como la diferencia entre batimetrías, expuesto en el apartado 4.1.4.3, para el intervalo 2 de 1.54 Hm^3 . Estos resultados suponen unos índices de eficiencia y desviación de la validación de $NS = 0.989$ y $P_{bias} = -2.539$ respectivamente. Según los resultados de la Tabla 4.15 y la Tabla 4.19 estos valores suponen en ambos casos un resultado muy bueno.

En el presente apartado se han definido los parámetros de calibración de las simulaciones mediante el modelo TETIS y su módulo sedimentológico TETIS-SED y se ha constatado que sus resultados suponen una aproximación satisfactoria al comportamiento hidrológico y sedimentológico observado en la cuenca. Esta afirmación se fundamenta en los óptimos resultados de distintos índices de fiabilidad en la calibración y la validación del modelo a distintas escalas temporales y espaciales. Por ello se ha concluido que los parámetros de corrección optimizados en este apartado, son representativos del comportamiento de la cuenca. Por tanto, se pueden utilizar para modelizar otros eventos meteorológicos o escenarios climáticos y de cambios en los usos del suelo que se planteen, siempre y cuando no se modifiquen las categorías y valores intrínsecos de los parámetros.

4.2.6. Resultados y análisis de las simulaciones

Se ha simulado la hidrología de la cuenca de estudio para todo el periodo instrumental, dividido en diferentes intervalos temporales (apartado 4.1.4.4), considerando los usos del suelo correspondientes a estos periodos (apartado 4.1.1.2). Mediante estas simulaciones se ha conseguido reconstruir y homogeneizar los datos hidrológicos, y particularmente de transporte de sedimentos a nivel de evento, así como determinar el papel de los diferentes componentes intrínsecos (cambios de uso de suelo, cobertera vegetal) y extrínsecos (eventos de lluvia extremos frente a eventos moderados).

En el presente apartado se muestran los resultados de las simulaciones de flujos de agua y sedimento para los periodos seleccionados, y se discute la relación entre éstos y los datos observados. Igualmente se presentan los resultados obtenidos para los eventos extremos y su contribución a las tasas de producción de sedimento en la cuenca de estudio. La parte correspondiente al análisis busca encontrar una justificación a las incertidumbres del modelo orientada a simular correctamente algunos de los periodos de estudio, determinar la importancia de los factores que influyen en la generación y el transporte del sedimento, y definir la relación de las tasas de erosión y acumulación del presente estudio con los resultados definidos en la bibliografía.

4.2.6.1. Variaciones temporales en la producción de sedimento

Los resultados de las simulaciones hidrológicas mediante el modelo TETIS para cada uno de los siete periodos considerados, comparados con los datos de observación expuestos anteriormente (Tabla 4.16), se presentan en la Tabla 4.22 y en la Figura 4.12. En los resultados de las simulaciones generales, el periodo 7 (del 9 de 2011 al 12 de 2012) se encuentra incluido en el periodo 6 (de 2009 a 2012), con el fin de evitar duplicidades en los datos, dado que no existen cambios en la información de los usos de los suelos entre los dos periodos.

En la Tabla 4.22 se identifican bajos índices de Nash Sutcliffe en dos de las simulaciones aunque el índice de la simulación completa es bueno (0.809). Respecto a la Figura 4.12, se observa que existe una muy buena correlación entre los picos mayores de precipitación y los picos de caudal simulado. Respecto a la producción de sedimentos, la simulación sedimentológica (TETIS-SED) obtenida para cada uno de los periodos se ha comparado con los datos de volumen de sedimento acumulado en Valdeinfierno (Figura 4.19 y en la Tabla 4.23).

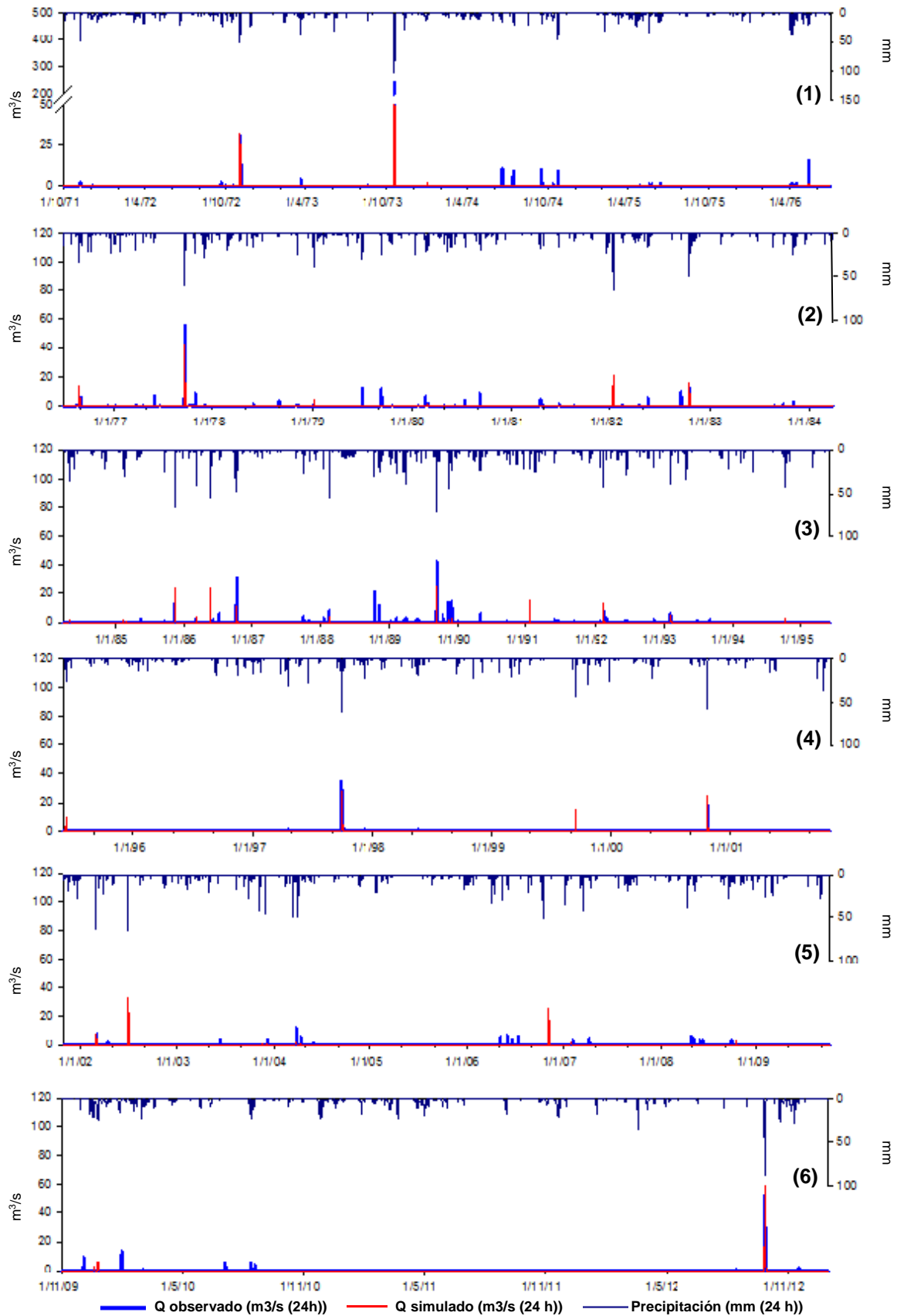


Figura 4.18: Hidrogramas del caudal de simulación calculado en la cuenca de Valdeinfierno mediante el modelo TETIS en los distintos periodos considerados (1971-76(1), 1976-84(2), 1984-95(3), 1995-01(4), 2001-09 (5), 2009-12(6)), frente al caudal observado (eje inferior) y el hietograma de precipitación en la cuenca (eje superior).

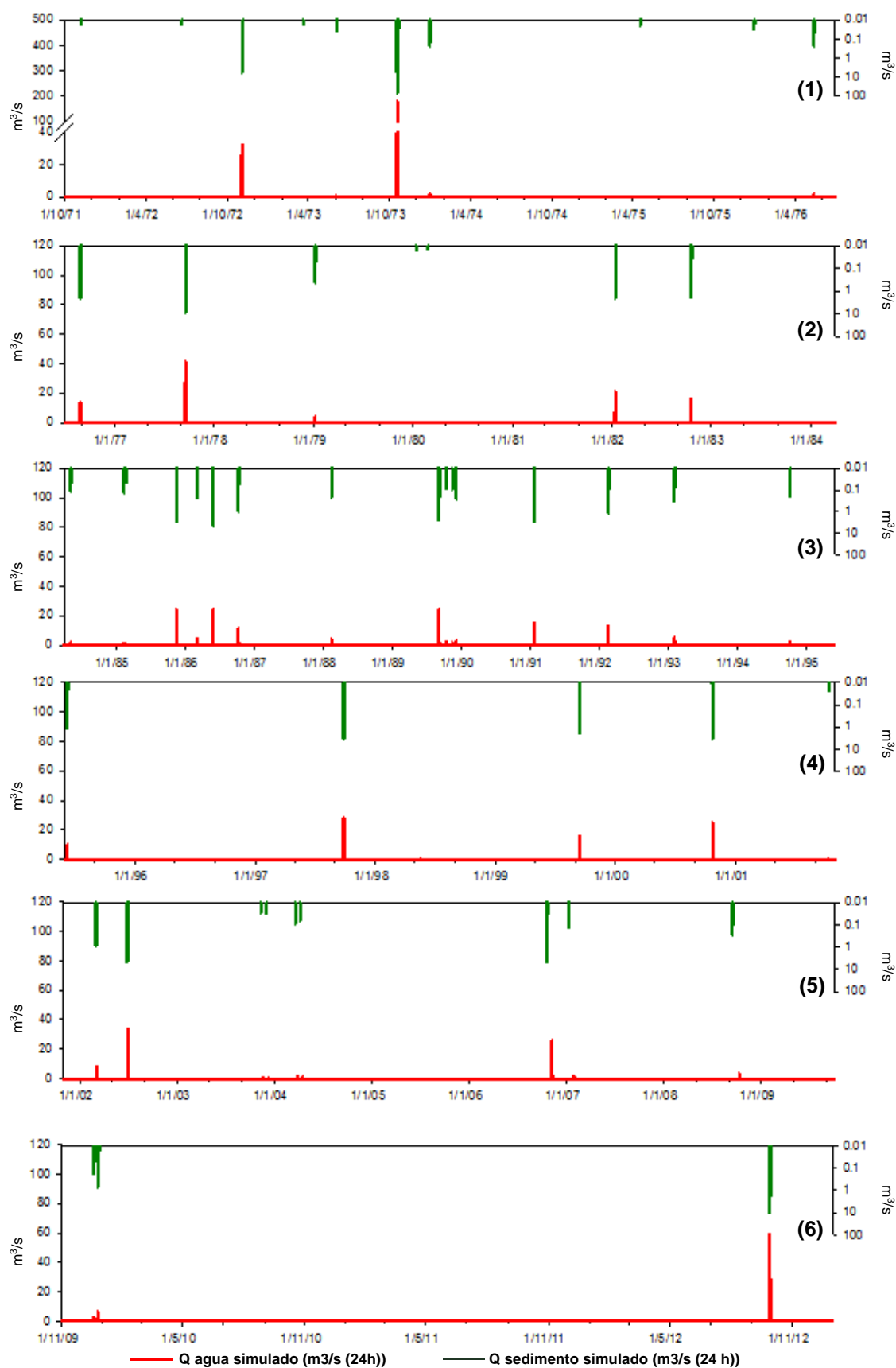


Figura 4.19: Caudales de sedimento simulados en la cuenca de Valdeinfierno utilizando el modulo TETIS-SED (eje superior), frente al caudal simulado mediante el modelo TETIS (eje inferior), para cada uno de los periodos considerados (1971-76(1), 1976-84(2), 1984-95(3), 1995-01(4), 2001-09 (5), 2009-12(6)).

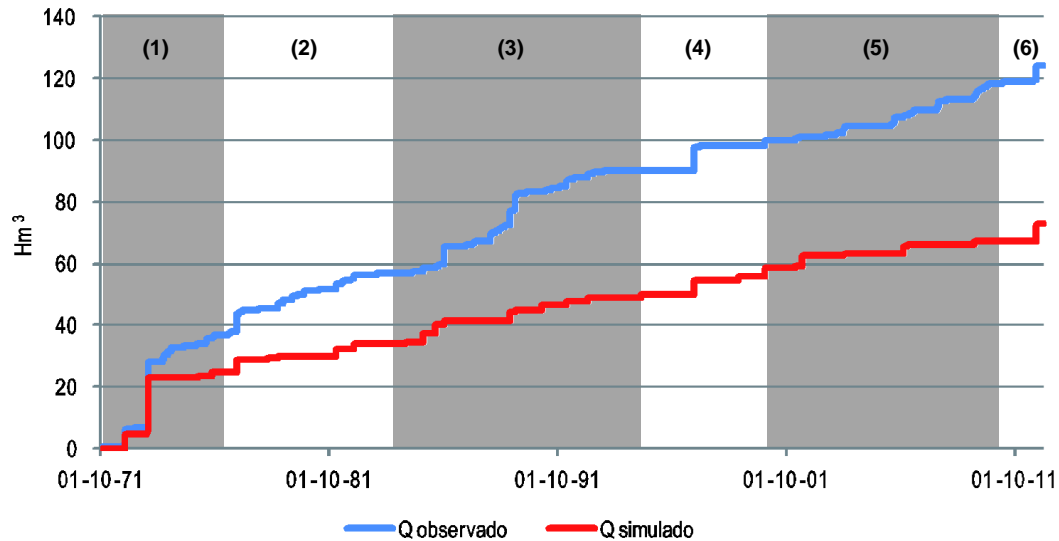


Figura 4.20: Volumen acumulado mediante los caudales de flujo observado y simulado utilizando el modelo TETIS, durante todo el periodo instrumental en la cuenca de Valdeinfierno. La alternancia en la coloración de fondo, indica cada uno de los periodos de simulación considerados (1971-76(1), 1976-84(2), 1984-95(3), 1995-01(4), 2001-09 (5), 2009-12(6)).

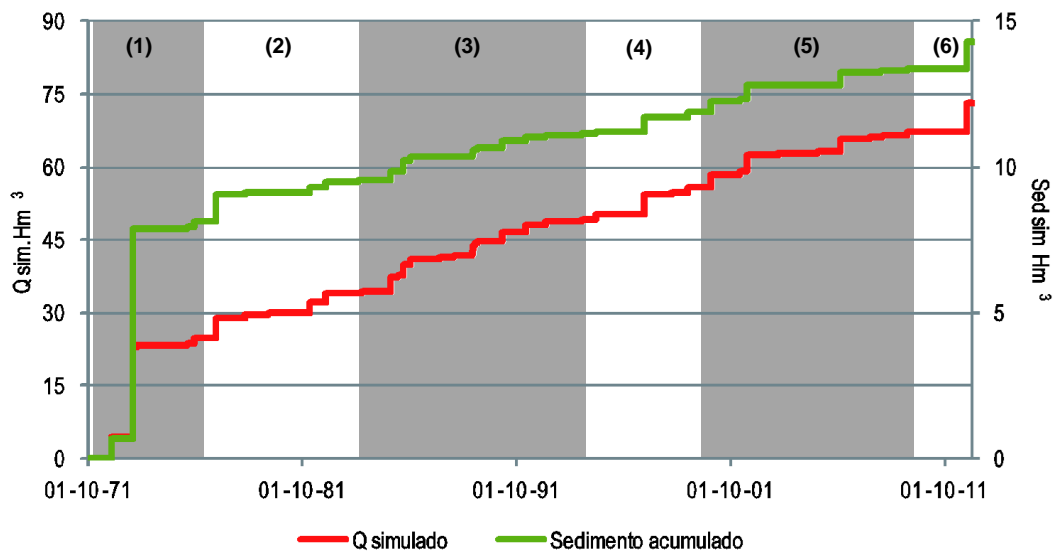


Figura 4.21: Volumen acumulado mediante el caudal simulado de flujo líquido y de sedimentos, utilizando el modulo TETIS-SED durante todo el periodo instrumental en la cuenca de Valdeinfierno. Debido a la diferencia de escalas entre los volúmenes, los resultados de caudal líquido se presentan en el eje principal (izquierdo) y los resultados del caudal de sedimentos se presentan en el eje secundario (derecho). La alternancia en la coloración de fondo, indica cada uno de los periodos de simulación considerados (1971-76(1), 1976-84(2), 1984-95(3), 1995-01(4), 2001-09 (5), 2009-12(6)).

En la Tabla 4.23 se observa que independientemente de los resultados de la calibración y validación sedimentológica y la limitación de la cantidad de datos, la fiabilidad de la simulación de transporte de sedimentos del modelo es muy buena en todos los casos. Igualmente, en la Figura 4.19 se observa que existe una excelente correlación entre los picos de caudal y de flujo de transporte de sedimentos simulados. En esta figura ha sido necesaria la utilización de una escala logarítmica para la representación del flujo de sedimento, ya que la diferencia entre el

transporte de sedimentos en eventos de magnitudes tan distintas hace que en una escala lineal el transporte durante eventos grandes (transporte de sedimentos $>10 \text{ m}^3/\text{s}$) enmascare al producido en los eventos pequeños (transporte de sedimentos $<1 \text{ m}^3/\text{s}$).

periodo	nº años	V obs (Hm³)	V sim (Hm³)	V obs/año (Hm³)	V sim/año (Hm³)	Q max obs (m³/s)	Q max sim (m³/s)	índice NS
1971-76 (1)	5	35.6	23.5	7.1	4.7	245.60	179.96	0.908
1976-84 (2)	8	21.3	10.5	2.7	1.3	56.60	41.84	0.665
1984-95 (3)	11	33.3	15.1	3.0	1.4	43.06	24.38	0.253
1995-01 (4)	6	9.9	9.4	1.6	1.6	35.43	28.64	0.667
2001-09 (5)	8	13.0	7.8	1.6	1.0	12.81	33.35	-0.2031
2009-12 (6)	3	11.3	6.7	3.8	2.2	52.31	59.29	0.842
1971-2012	41	124.3	73.1	3.0	1.8	245.60	179.96	0.809

Tabla 4.22: Valores de caudal (Q), volumen de agua acumulado en el en el embalse (V) y valor del índice de Nash Sutcliffe (NS), observados y simulados en la cuenca de Valdeinfierno en los distintos periodos de simulación, utilizando la calibración del periodo 2.

periodo	nº años	Vol sed simulado (Hm³)	Vol sed batimetrías (Hm³)	NS	Pbias
1976-84 (2)	8	1.579545	1.540428	0.989392423	2.53941938
1984-95 (3)	11	1.616608	1.501000	0.953675819	7.70210349

Tabla 4.23: Valores de volumen de sedimento acumulado en el embalse de Valdeinfierno, procedentes de las batimetrías y simulado, valor del índice de Nash Sutcliffe (NS) y desviación Pbias en la cuenca de Valdeinfierno durante los distintos periodos de simulación en los que se dispone de datos batimétricos (periodo 2 y 3), utilizando la calibración del periodo 7.

Con el fin de poder discutir las relaciones entre el aporte total volumétrico del caudal líquido observado y simulado, y del caudal de sedimentos, y poder determinar la erosión producida en la cuenca durante todo el periodo instrumental, se ha calculado la relación volumétrica de transporte entre el caudal de agua de salida de la cuenca y el volumen de sedimento movilizado para el total del periodo (Figura 4.20 y Figura 4.21)

En la Figura 4.20 se observa que el caudal observado es bastante superior al simulado, tanto en los picos máximos como en periodos de acumulación de eventos menores. Este resultado es indicativo de que el modelo TETIS tiende a infravalorar el caudal que llega al embalse. En la Figura 4.21 se observa la influencia de los picos máximos simulados de caudal líquido sobre el transporte de sedimentos, así como las tendencias de acumulación de los periodos sin grandes eventos. Se pone de manifiesto que el efecto del pico de caudal máximo en el transporte de sedimento es muy elevado, y que en periodos con eventos de poca magnitud se produce una tasa de producción de sedimentos mucho menor que la tasa de flujo de agua.

4.2.3.2. Incertidumbres y robustez de las simulaciones

Los resultados de las simulaciones hidrológicas del modelo TETIS suponen una aproximación aceptable al comportamiento real de la cuenca en su conjunto, tal y como indican los distintos índices utilizados. No obstante, se ha observado que la simulación de la cuenca en los intervalos considerados no siempre es aceptable.

Los periodos 3 y 5 presentan valores de fiabilidad deficientes (< 0.6). La comparación entre los resultados (Tabla 4.16 y la Tabla 4.22) indican que existe una relación entre los valores bajos de aportes medios anuales al embalse y la baja fiabilidad del modelo (índices NS más bajos). Por tanto, en periodos de baja esorrentía el modelo pierde robustez y aumentan los errores en los resultados. La fiabilidad del modelo también se ve afectada por la magnitud de los picos, de tal manera que en periodos con dominio de los eventos pequeños la fiabilidad de la simulación, mientras que para periodos con eventos grandes la fiabilidad aumenta (Tabla 4.22). Por ello, el periodo con el mayor evento (periodo 1) presenta la mayor fiabilidad y el periodo con los eventos más discretos (periodo 5) corresponde al de menor fiabilidad. Este efecto también se advierte en todos los periodos considerados en la Figura 4.18, en la que el modelo no es capaz de simular correctamente la mayoría de eventos por debajo de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ (en 24h). Otro factor que influye en la fiabilidad de la simulación es su duración. Entre los periodos 6 (0.667) y 7 (0.967), se observa que para un periodo mayor de tiempo y el mismo evento máximo, el índice NS es menor. Este problema puede ser debido a la inclusión de un mayor número de eventos de baja intensidad que resultan en la suma de errores.

La presencia de múltiples picos de caudal de magnitud parecida en un mismo periodo es otra posible fuente de divergencia entre los resultados de la modelización y los datos de observación. Tal y como se deduce de la ecuación 4.3, el cálculo del índice NS depende de la media de observaciones y la desviación entre las series de observación y simulación. Esta doble dependencia favorece que durante periodos con múltiples picos de esorrentía de una magnitud elevada, aunque no extraordinaria (entre 15 y $30 \text{ m}^3/\text{s}$ en 24 horas), y con un intervalo de simulación largo, se obtenga como resultado una media de observación más baja que el sumatorio de las diferencias entre observaciones y simulaciones, que a su vez implica índices NS más bajos.

La intensidad de la lluvia y, consecuentemente, los caudales instantáneos y máximos de los son otros parámetros que afectan substancialmente a la correcta simulación de modelo. Los datos cincominutales del SAIH del nivel del embalse indican, como cabe esperar, que utilizar valores medios de intensidad de lluvia y caudal no es realista, ya que la mayor parte de las avenidas presentan una duración inferior a las 24 horas. Por tanto, la simulación hidro-sedimentaria con intervalos de tiempo diarios de eventos con duración real de pocas horas constituye uno de los principales elementos de incertidumbre de esta modelización, ya que la transformación de caudal (lluvia) instantáneo(a) a valores medios diarios que fuerzan el comportamiento hidrológico y sedimentológico de los procesos intervinientes (erosión y esorrentía) durante el proceso de calibración. Como se ha argumentado en el apartado 4.1.2, se ha considerado más importante la simulación homogénea de todo el periodo instrumental que la elaboración de hietogramas sintéticos mediante curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), ya que no se dispone de medidas de producción de sedimentos con resolución temporal equivalente.

Los periodos con menor fiabilidad de simulación (periodos 2, 3 y 5) son los que contienen el menor número de días con aportes al embalse, aunque en realidad no son los que tienen el menor número de días de precipitación por año. Esta divergencia ha determinado la necesidad

de calcular la relación porcentual entre el caudal y la precipitación para cada periodo (Tabla 4.24). Los dos periodos con menor porcentaje de días con lluvia que producen escorrentía coinciden con los dos periodos con mayores diferencias entre las series observadas y simuladas (periodos 3 y 5). Esta posible fuente de error tiene una influencia limitada en la simulación general de todo el periodo, que en conjunto presenta una elevada fiabilidad (Tabla 4.22). Este resultado indica que los eventos extraordinarios son los que determinan el comportamiento hidrológico de la cuenca de Valdeinfierno a lo largo del periodo instrumental, lo que coincide con las conclusiones de otros trabajos realizados en la zona (Armas, 1996, 1998; Benito et al., 2010). En general, los resultados de las simulaciones de caudal máximos de caudal y volumen de agua acumulada en el embalse son inferiores a los observados, indicando que el modelo TETIS supone una aproximación conservadora. Este resultado es coherente con los expuestos en otros trabajos en los que ha sido utilizado el mismo modelo (Frances et al., 2007; Bussi et al., 2009; Velez et al., 2009; Bussi et al., 2013).

nº periodo	Días con Q/ año	Días con P/año	Días Q / días P (%)
1971-76 (1)	35.8	83.0	43.13 %
1976-84 (2)	17.4	59.5	29.20 %
1984-95 (3)	17.5	71.4	24.59 %
1995-01 (4)	44.7	108.8	41.04 %
2001-09 (5)	21.5	113.1	19.01 %
2009-12 (6)	55.0	107.3	51.24 %

Tabla 4.24: Relación entre los días en los que se produce escorrentía a nivel de cuenca y los días que se produce precipitación.

Debido a las limitaciones expuestas en la simulación hidrológica, TETIS-SED sólo permite simular con buena fiabilidad la producción de sedimento durante eventos con caudal superior a 20 m³/s. La eliminación de eventos menores implica que las tasas estimadas de producción de sedimento serán inferiores a la real (Nunes et al., 2005). Sin embargo, cuando se considera el conjunto de los periodos simulados existe una buena correspondencia entre los valores simulados y los observados tanto en distribución temporal como espacial. Por un lado, los picos de caudal de sedimento y caudal líquido coinciden en su distribución temporal (Figura 4.19), y la producción de sedimento simulada se aproxima al volumen sedimentado en las presas, incluso en periodos en los que la simulación hidrológica es deficiente (periodo 3). La simulación de sedimentos transportados resultante del modelo es representativa de la cuenca de estudio a todas las escalas, como se pone de manifiesto en los sedimentos atrapados en los diques de corrección hidrológico-forestal. Este resultado contradice algunos trabajos anteriores que consideran que las tasas de acumulación en diques que colectan sedimento en pequeñas cuencas no representan la erosión a escala de cuencas mayores (Van Rompaey et al., 2001; Renschler y Harbor, 2002; Van Rompaey et al., 2005). Posiblemente, la diferencia entre el presente estudio y los citados trabajos es la distribución espacial de los puntos de registro de volumen y la precisión en la medida de los depósitos de sedimentos transportados (medidos mediante LIDAR y RTK-GPS).

La extrapolación de la escorrentía y la erosión de escala de subcuenca a escala de cuenca puede multiplicar el error exponencialmente, generando grandes desviaciones de ligeras imprecisiones en los datos de origen. El modelo TETIS-SED es un modelo hidrológico distribuido que

requiere un mayor número de parámetros de entrada que los modelos no distribuidos más simples. No obstante los modelos distribuidos tienen la ventaja que permiten simular el transporte de sedimentos en cualquier punto de la cuenca, y que, tras una calibración correcta, pueden ser utilizados como herramienta de gestión a escala de cuenca orientada a definir posibles impactos derivados del cambio global (de Vente et al., 2008).

4.2.6.2. *Tasas producción y transporte de sedimentos con TETIS-SED*

La erosión media anual producida en cada uno de los intervalos se ha calculado partiendo del sedimento acumulado en el Embalse de Valdeinfierno. En la Figura 4.21 se observa que la pendiente de la curva de sedimento acumulado es mucho menor que la de agua, indicando que los eventos de escorrentía menores no tienen capacidad para erosionar y movilizar el sedimento de las laderas. Igualmente, la curva acumulada de sedimento presenta unos escalones que indican que la mayor parte de sedimento se produce durante los eventos extremos (Tabla 4.26). Los valores de la Tabla 4.25 confirman que la mayor tasa anual de erosión se produce para el periodo de 1971 a 1976 (1) (38 t/Ha), mientras que la mínima se corresponde al periodo de 2001 a 2009 (4) (3 t/Ha), con una diferencia entre ambas tasas de erosión es de un orden de magnitud.

Nº periodo	Nº años	Vol agua total sim (Hm³)	Vol sed generado sim (Hm³)	Relación vol sedimento/agua (%)	Producción anual de sedimento (t/Ha)
1971-76 (1)	5	23.49	7.92	33.72%	38.03
1976-84 (2)	8	10.47	1.58	15.08%	4.74
1984-95 (3)	11	15.12	1.62	10.69%	3.53
1995-01 (4)	6	9.39	1.12	11.95%	4.49
2001-09 (5)	8	7.84	1.05	13.40%	3.15
2009-12 (6)	3	6.75	0.99	14.70%	7.94

Tabla 4.25: Relación entre volumen de agua y volumen de transporte de sedimento simulados en la cuenca, y erosión anual derivada de los resultados de las simulaciones. La erosión media anual se refiere a la tasa de transporte de sedimento que llega al embalse dividida por la superficie total de la cuenca.

Nº periodo	Q agua max día sim (m³/s)	Q sed max día (m³/s)	Relación pico sedimento/agua (%)	Erosión máximo evento periodo (t/Ha)
1971-76 (1)	179.96	75.94	42.20%	157.54
1976-84 (2)	41.83	9.52	22.76%	19.75
1984-95 (3)	24.37	4.180	17.15%	8.67
1995-01 (4)	28.63	3.59	12.54%	7.45
2001-09 (5)	33.34	4.93	14.80%	10.24
2009-12 (6)	59.29	9.78	16.50%	20.29

Tabla 4.26: Caudal máximo de salida de la cuenca, caudal máximo de sedimento movilizado y erosión máxima en 24 h producida en la cuenca de Valdeinfierno, en cada uno de los periodos de simulación considerados.

Los valores de producción de sedimentos estimados en los periodos 2,3,4 y 5 se corresponden muy bien con las tasas de erosión calculadas en las batimetrías de Valdeinfierno (Tabla 4.13), y están de acuerdo con los resultados obtenidos por Romero Díaz et al. (2007) y de Vente et al.(2008). Por el contrario, los periodos 1 y 6 (ambos siendo los más cortos de este registro) contienen las mayores tasas de erosión anual de toda la serie instrumental. Estos valores se

encuentran muy por encima de las tasas de erosión calculadas en las batimetrías, con valores parecidos e incluso por encima de los máximos obtenidos por de Vente et al. (2005) en base a datos de embalses de SE de España (y en particular de Valdeinfierno, Tabla 4.28).

La elevada tasa de erosión en los periodos 1 y 6 se debe a que en ambos se registra un pico de gran magnitud. Comparando la Tabla 4.25 y la Tabla 4.26 se observa que la erosión de los picos máximos diarios es mucho mayor que las medias anuales. Este resultado ha motivado la comparación de la influencia de los picos en todo el periodo simulado. En la Tabla 4.27 se observa la relación de transporte entre la erosión generada durante un evento máximo frente a la erosión media, y la influencia de la erosión máxima sobre el total en cada uno de los periodos de simulación. Resulta patente que en los periodos que contienen los picos de caudal máximo (periodos 1 y 5) la contribución de estos eventos extremos supera el 80% de la erosión media anual durante el periodo. Este resultado es consistente con los resultados obtenidos por otros autores sobre la contribución sedimentaria de los picos extremos respecto al volumen de sedimento total. Por ejemplo, en una sub-cuenca del río Guadalentín, próxima a la zona del presente estudio, Baartman et al. (2012) concluye a partir de simulaciones que el 42% del volumen de sedimento producido en dicha cuenca a lo largo de una década se produce durante un único evento extremo de lluvia. En un estudio de conjunto de la cuenca del Guadalentín, López Bermúdez (1990) indica que los eventos extremos producidos en tres años consecutivos, (1984, 1985, 1986) representaron más del 25%, 50% y 77.4% respectivamente, de la erosión total del anual. En esta misma línea, la modelización con TETIS-SED indica igualmente que los eventos singulares de gran magnitud tienen una mayor influencia sobre la producción de sedimento que sobre la hidrología. Analizando los resultados presentados en la Tabla 4.25 y la Tabla 4.26 se observa que el porcentaje de carga sólida del caudal es más elevada cuanto mayor es el pico. Esto indica que el aumento de caudal en la cuenca no aumenta tan solo la capacidad de transporte de sedimento en el cauce, sino que también aumenta la capacidad erosiva de los procesos hidrológicos.

Nº periodo	Nº años Periodo	Erosión máximo evento (t/Ha)	Erosión media anual (t/Ha)	Erosión máximo evento/duración periodo (t/Ha)	% De la erosión media anual dependiente de la erosión del máximo evento
1971-76 (1)	5	157.55	38.028	31.50	82.9%
1976-84 (2)	8	19.75	4.74	2.47	52.1%
1984-95 (3)	11	8.67	3.53	0.79	22.3%
1995-01 (4)	6	7.45	4.49	1.24	27.7%
2001-09 (5)	8	10.24	3.15	1.28	40.6%
2009-12 (6)	3	20.29	7.93	6.76	85.2%

Tabla 4.27: comparación entre la erosión máxima y media en 24 h y influencia de la erosión máxima sobre la erosión total producida en la cuenca de Valdeinfierno, en cada uno de los periodos de simulación considerados.

La utilización del sedimento retenido en los diques y en la presa como datos de partida para el cálculo de la erosión permite comparar los resultados obtenidos con los descritos en la bibliografía (Tabla 4.27 y Tabla 4.28.). En dicha comparación se observa que los valores máximos y mínimos de erosión anual son coherentes con los valores calculados en otros trabajos en la cuenca de Valdeinfierno y zonas similares. Sin embargo, en la mayor parte de estos estudios se muestran tasas de erosión media anual, y en contadas ocasiones se aporta

información sobre producción de sedimento en eventos extremos. Los resultados de distribución de la erosión en la cuenca de Valdeinfierno durante picos de avenida demuestra la necesidad de especificar la contribución de la producción de sedimentos durante los eventos máximos y su distribución espacio-temporal. La generalización de las tasas de erosión en cuencas con un marcado carácter torrencial (como la cuenca de Valdeinfierno) conduce a un resultado que supone una media de los valores extremos, poco representativa del proceso real, que subyace en la generación de sedimentos.

Técnica de medida	Zona de estudio	Erosión (t/Ha*año)	Referencia
USLE	Valdeinfierno (valor máximo en cárcavas)	125	(Lopez-Bermudez, 1990)
Transectos geomorfológicos	Región de Murcia	105 (Margas) 63 (Conglomerados) 29 (Esquistos)	(Romero-Díaz et al., 2010)
Medidas geométricas y topográficas	Región de Murcia	90.68	(Romero-Díaz et al., 2011)
Medidas geométricas y topográficas	Cuenca del Cárcavo (Murcia)	87	(Lesschen et al., 2008)
Transectos geomorfológicos	Región de Murcia	64.33	(Romero-Díaz et al., 2011)
Transectos geomorfológicos	Murcia	71-93 (Margas) 17-40 (Conglomerados)	(Chaparro y Esteve, 1995)
Perfiles longitudinales	Región de Murcia	50.05	(Romero-Díaz et al., 2011)
Medidas de campo	Cuenca del Guadalentín (áreas de surcos y cárcavas)	36.6-37.6	(Poesen et al., 2002)
USLE	Valdeinfierno	30.62	(Romero-Díaz et al., 1992)
Diques	Región de Murcia	20	(Romero-Díaz et al., 2007)
USLE	Cuenca Guadalentín	17.9 (medidas entre 10.75 y 36.06)	(Romero-Díaz et al., 2007)
Parcelas abiertas	Región de Murcia	8.77	(Romero-Díaz et al., 2011)
Batimetrías	Región de Murcia	5	(Romero-Díaz et al., 2011)
Aforos en cuencas	Valdeinfierno	4.8	(Avedaño, 1997)
Diques	Región de Murcia	4.67	(Romero-Díaz et al., 2011)
Aforos en cuencas	Región de Murcia	3.95	(Romero-Díaz et al., 2007)
Diques	Rio Quípar (Murcia)	3.5 (medidas entre 0.002-72.47)	(Romero-Díaz et al., 2007)
Simulación de lluvia	Región de Murcia	2.46 (estaciones entre 0 y 14.36)	(Romero-Díaz et al., 2011)
Aforos en cuencas	Valdeinfierno	1.97	(Sanz Montero et al., 1998)
Aforos en micro cuencas	Región de Murcia	1.77	(Romero-Díaz et al., 2011)
Parcelas cerradas	Región de Murcia	1.68	(Romero-Díaz et al., 2011)
Aforos en cuencas	Valdeinfierno	1.5-10	(de Vente et al., 2005)
Clavos de erosión	Región de Murcia	1.37	(Romero-Díaz et al., 2011)
Diques	Sierra de Gádor (Almería)	0.55-27.3	(Martín-Rosales et al., 2003)
Simulación de lluvia	El Ardal (Murcia)	0.09-0.6	(Morgan, 2001)
Diques	Puentes	0.08-30	(Cammaraat, 2002; Cammaraat, 2004)
Aforos en cuencas	Región de Murcia	0.02	(Romero-Díaz et al., 2011)
Aforos en cuencas	El prado (Murcia)	0.00058-0.68	(Baartman et al., 2012)

Tabla 4.28: Diversos valores de erosión determinados en la bibliografía en zonas próximas o en la cuenca de estudio, organizados en función de la técnica de medida, y de mayor a menor valor de erosión.

4.2.7. Discusión de los resultados de las simulaciones

La calibración y validación de los resultados de las simulaciones hidrológicas y sedimentológicas en función de los valores observados en la cuenca, han permitido analizar la eficiencia y fiabilidad del modelo TETIS-SED, así como el comportamiento hidrológico y sedimentológico de la zona de estudio, permitiendo una mejor comprensión de la distribución espacio-temporal de la producción de sedimento.

Se ha determinado que las condiciones ambientales (intensidad de lluvia, periodos de sequía, etc.), las características de los eventos (intensidad, magnitud, etc.), la duración de las simulaciones y la precisión de los datos de origen afectan a la fiabilidad del modelo TETIS. Así, los menores errores se presentan cuando se emplean intervalos de tiempo de simulación relativamente cortos y con picos singulares de magnitud elevada. Los mayores errores se producen en las simulaciones para intervalos largos con eventos de baja magnitud. Estas observaciones han permitido afirmar que la fiabilidad del modelo TETIS es mayor cuanto mayor es el evento que se pretende simular.

Comparando la modelización con los datos instrumentales se ha detectado que en la zona de estudio el modelo TETIS tiende a subestimar los resultados de volumen de sedimento y de caudal líquido. Este resultado es un problema recurrente de este modelo de simulación, expuesto por distintos autores (Frances et al., 2007; Bussi et al., 2009; Velez et al., 2009; Coccia y Todini, 2011; Bussi et al., 2013). No obstante esta fuente de error no es determinante para la fiabilidad del modelo, ya que la precisión obtenida mediante los índices de fiabilidad considerados en el presente estudio, indican que el modelo hidrológico TETIS para el periodo de simulación en la presa de Valdeinfierno es fiable.

Respecto a la simulación de producción de sedimentos se observa que la fiabilidad del módulo sedimentológico TETIS-SED depende de la precisión de los datos físicos del terreno y de la modelización hidrológica. El sedimento transportado es determinado como la cantidad de sedimentos que el caudal simulado es capaz de movilizar. Este hecho hace que al contrario que para el modelo hidrológico, la duración de los intervalos seleccionados para la calibración y la validación no afecte la precisión. En el caso de Valdeinfierno se ha observado que los flujos de sedimento y de caudal simulado se corresponden casi perfectamente. La correspondencia de los sedimentos simulados respecto a los registrados en los diques de retención de sedimentos y la presa de Valdeinfierno es de satisfactoria a muy buena tanto a escala de sub-cuenca como de cuenca.

Los buenos resultados de calibración y validación de la simulación sedimentaria contradicen estudios anteriores donde se afirma que la calibración en los diques pequeños no es indicativa de las tasas generadas en la cuenca (Takken et al., 1999; Van Rompaey et al., 2005). La alta resolución de la toma de datos de diques de retención antes y después de una avenida

importante ha permitido minimizar el error a de las estimaciones a escala de dique, por lo que extrapolando a escala de cuenca, los errores derivados son aceptables.

Las simulaciones realizadas para distintos periodos indican que los volúmenes de sedimentos más elevados se generan durante periodos en los que se concentran los mayores eventos de escorrentía en los que la erosión de los picos máximos diarios es mucho mayor que las medias anuales. Se puede concluir que el comportamiento hidrológico de la cuenca de Valdeinfierno está determinado por los eventos máximos de escorrentía.

Por tanto, el análisis y gestión de los problemas de erosión deben de considerar su distribución espacio-temporal y volumen producido por evento, dado que una tasa de erosión media puede ser poco representativa del proceso real. Esta puntualización es especialmente importante en cuencas con régimen hidrológico Mediterráneo como la cuenca de Valdeinfierno, en las que los procesos de erosión están dominados por la magnitud de los eventos puntuales.

Se ha demostrado que los eventos que determinan el comportamiento de la cuenca de estudio, coinciden con los eventos que el modelo es capaz de simular con mayor precisión. Por consiguiente se concluye que el modelo hidrológico distribuido TETIS conjuntamente con su módulo sedimentológico TETIS-SED es una buena aproximación al comportamiento de la cuenca de Valdeinfierno, permitiendo una mejor comprensión de los fenómenos hidrológicos y erosivos, y del papel y peso de los diferentes parámetros que intervienen en estos.

4.3. Influencia de la gestión del territorio en las tasas de erosión y producción de sedimento

En la cuenca del río Segura, la lucha por disminuir el riesgo de inundaciones y aumentar la protección de los suelos constituyen una constante a lo largo de la historia (Anonymous, 1891b; Montiel Pinilla, 1955; Romero Díaz y Maurandi Guirado, 2000).

El efecto del clima sobre la erosión en las cuencas, es evidente aunque no es el único factor a tener en cuenta en el estudio de los procesos de erosión, ya que no determina la propia erodibilidad del suelo. La mayoría de elementos que influyen en la erodibilidad (geología, la tipología de suelo, la pendiente media de las laderas, etc.), no son modificables. Sin embargo, existen diversos factores que afectan a la protección del suelo y que dependen del uso y de la cubierta vegetal, y que puede variar a lo largo del tiempo.

La clasificación de los distintos tipos de usos del suelo considerados se ha centrado en la proporción y distribución de la vegetación en la cuenca, ya que la eficacia de la cubierta vegetal frente a los procesos erosivos ha sido demostrada en numerosos estudios a nivel mundial (Van Oost et al., 2000; Erskine et al., 2002; Garcia-Ruiz y Lana-Renault, 2011), y en distintas partes de la cuenca del río Segura en particular (Calatrava et al., 2011; de Vente et al., 2011). Los usos

del suelo, prácticas agrícolas y prácticas ganaderas inadecuadas, así como el abandono de los campos de cultivo, reducen dicha cubierta vegetal y por lo tanto favorecen la aceleración de los procesos erosivos (Lesschen et al., 2008; Moran-Tejeda et al., 2010). Debido a la dificultad de desarrollo de la vegetación en las condiciones de clima semiárido de la zona, la recuperación de la cubierta vegetal natural es muy lenta y en ocasiones resulta imposible (Barbera et al., 1997; Castillo et al., 1997; Albaladejo et al., 1998). Por tanto, la gestión del suelo debe evitar la sobreexplotación agrícola y la deforestación, así como adaptar y priorizar políticas de corrección hidrológica y restauración forestal, para favorecer la conservación de los suelos (Romero-Díaz et al., 2011). Para la planificación territorial y en la modelización hidrológico-sedimentaria, se debe tener en cuenta que las variaciones en la ocupación del suelo no son fácilmente gestionables, ya que dependen de variables demográficas controladas por elementos de carácter socio-económico externos al medio natural (Aguirre Segura et al., 1997; Barriendos, 1997; Arnold et al., 1998).

En el presente apartado se ha pretendido incidir en la influencia de los usos del suelo en el comportamiento hidrológico y sedimentológico de la cuenca de estudio desde el punto de vista físico. Por otro lado, también se pretende valorar la eficiencia de las configuraciones históricas de usos del suelo en términos de conservación y protección frente a los procesos de erosión. El objetivo final de la comparación de distintos usos a lo largo del periodo instrumental consiste en determinar si el modelo hidrológico y sedimentológico TETIS-SED puede ser utilizado como una herramienta de planificación territorial para la gestión de la conservación, tal y como recomiendan Van Rompaey et al. (2001).

4.3.1. Historia reciente de los cambios de uso del suelo y gestión del territorio

En la zona de estudio existe información de la gestión histórica del terreno y sus efectos sobre las avenidas a lo largo de los dos últimos siglos. Desde finales del siglo XIX y principios del XX se identifica la deforestación masiva de los montes de la cuenca alta del Guadalentín como un problema que debe ser solucionado para evitar las grandes avenidas y la erosión. El evento detonante para el planteamiento de medidas de mitigación de las inundaciones y la erosión es la avenida de Santa Teresa de 1879, que produjo grandes daños humanos y materiales (Anonymous, 1891b; Madariaga, 1898; Codorníu, 1906; Montiel Pinilla, 1948; Martínez Artero, 2001). Para combatir los efectos torrenciales de este tipo de avenidas, y en particular la colmatación de los embalses de Valdeinfierno y Puentes, se propuso replantar las zonas deforestadas, a la vez que construir obras hidráulicas que limiten los efectos de la erosión (Anonymous, 1891b; Reyes, 1900; Montiel Pinilla, 1955). En este sentido, en 1888 se crea la comisión de repoblaciones de la cuenca del Segura, que hasta 1901 consigue la declaración de utilidad pública de la zona de Sierra de Espuña (fuera del área de estudio), en la que se practican diversas campañas de repoblación (Madariaga, 1898; Mira, 1909; Martínez Artero, 2001). En la cuenca de Valdeinfierno, la deforestación a finales del siglo XIX es extrema, ya que

en 1891 la explotación maderera en los bosques de María y los Vélez estaba prácticamente agotada, con una extensión de deforestación de 23000 Ha (que supone un 34.5% de la extensión total de ambos municipios; Anonymous, 1891a). Este problema persiste pese a los esfuerzos de construcción de infraestructuras y replantaciones forestales de principios de siglo XX en la cuenca del río Alcaide (Codornú, 1906; Montiel Pinilla, 1955), ya que se mantiene la tala indiscriminada en áreas mucho mayores extendiéndose hacia la zona de la Rambla Mayor, haciendo inútil el esfuerzo de restauración (Codornú, 1906). En 1888 se crea la Comisión de Repoblación del Segura con el encargo de impulsar los trabajos de reforestación, y que según Montiel Pinilla (1955) no presentan grandes avances hasta 1948. De acuerdo con Montiel pinilla (1955), el estado de la cuenca de Valdeinfierno requiere una repoblación de 30000 Ha, lo que supone un 70 % del total de su superficie. La legislación elaborada en 1949, no consigue impulsar las obras programadas en el plazo de ejecución límite propuesto de 1959.

Entre 1940 y 1970, La administración pública adquiere el 27.5% de la cuenca de Valdeinfierno para la repoblación forestal (aunque solo se reforesta el 7.1%) mientras que el 16.68% se encuentra ocupado por bosque. Entre 1940 y 1956, se reforesta el 3.97% y se adquiere el 6.82% de la cuenca en forma de Bosque, entre 1956 y 1976 se reforesta el 3.12% restante y se adquiere el 5.64% de bosque, y entre 1976 y 1983 se adquiere el 3.22% de bosque restante (Araque Jiménez, 2009).

Todas estas políticas se ven modificadas con la entrada de España en la Unión Europea. La actividad económica de la zona de estudio se centra en la agricultura y ganadería, y por tanto, la ocupación del terreno en la cuenca de Valdeinfierno se encuentra fuertemente influenciada por las distintas políticas de subvenciones de carácter nacional e internacional. La principal fuente de financiación y regulación de los espacios agrarios vigente en la actualidad es la Política Agraria Común de la Unión Europea (PAC). Pese a que la PAC fue creada en 1962 (European-Comision, 2012a), los agricultores españoles no pudieron disfrutar de sus subvenciones hasta la entrada del país a la Comunidad Económica Europea (CEE), que se produjo en 1986 (European-Comision, 2012b). A raíz de la integración del país en la unión económica, y por consiguiente en las políticas agrarias, la producción agrícola experimenta un aumento de rentabilidad fomentada por los programas de ayudas, lo que conlleva un aumento significativo del suelo destinado a cultivos (European-Comision, 2012a). Debido a la sobreproducción de alimentos derivados de las subvenciones a la producción (European-Comision, 2012a), en 1992 la PAC se reforma para que se apliquen técnicas de cultivo extensivas, dejando grandes extensiones en barbecho (Boellstorff y Benito, 2005). Estas políticas perjudican a los pequeños terratenientes ya que no disponen de tierra suficiente para cultivos extensivos (Oñate et al., 1998). En el año 2000 se produce otra reforma de la PAC, en la que se decide invertir en el desarrollo rural. Posteriormente se implementa una nueva reforma parcial en 2003 desvinculando las ayudas agrarias a la producción, a cambio de seguir un conjunto de buenas prácticas agrícolas que fomenten la protección y la conservación rural (European-Comision, 2012a).

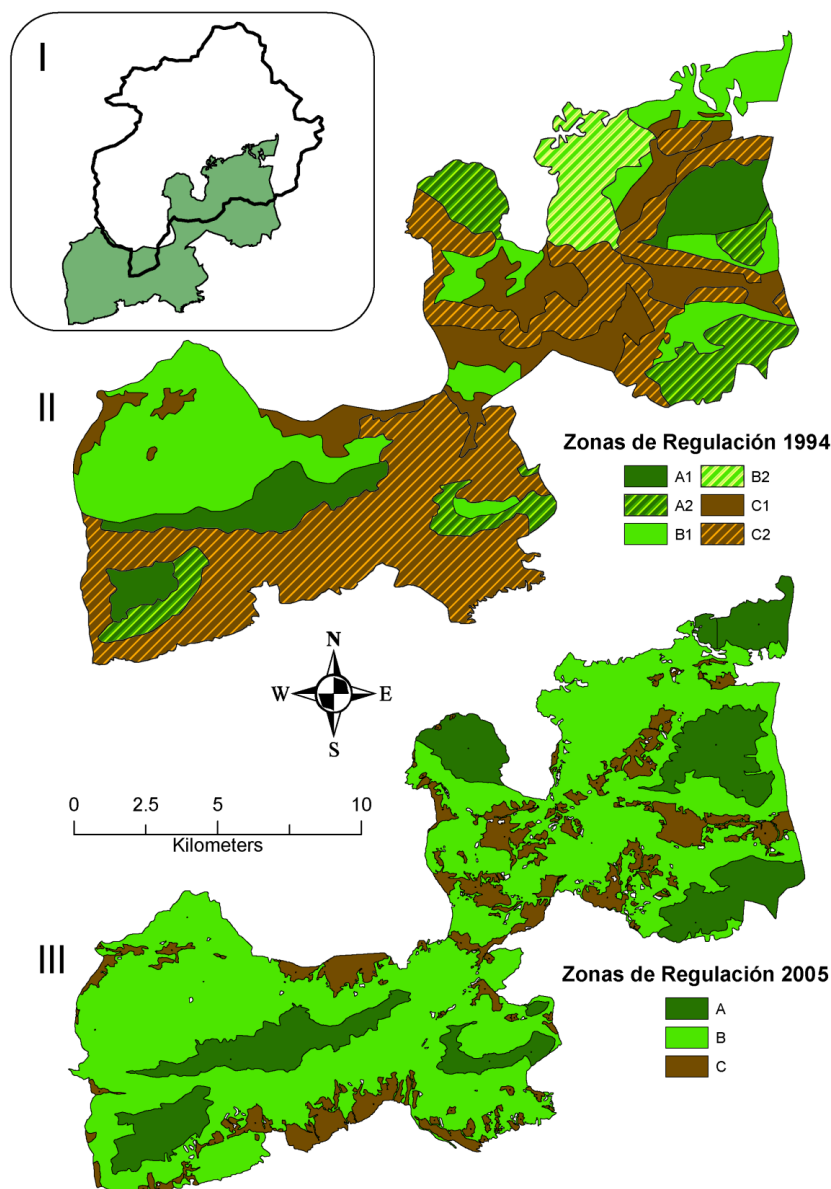


Figura 4.22: Zonas de protección natural por categoría del parque de Sierra María -Los Vélez. (I): Ubicación del parque respecto a la cuenca de estudio. (II): Mapa adaptado de Agencia-de-Medio-Ambiente (1994), en el que se indican las distintas categorías de protección del parque natural en 1994: A1, Ecosistemas excepcionales maduros. A2, Ecosistemas excepcionales en evolución. B1, Formaciones Boscosas. B2, Áreas de restauración Hidrológico-Forestal. C1, Áreas de cultivos tradicionales. C2, áreas de protección común (áreas naturales sin protección específica). (III): Mapa adaptado de Agencia-de-Medio-Ambiente, 2005 en el que se indican las categorías consideradas en 2005: A, Áreas de Reserva con valor ecológico y paisajístico. B, Zonas de regulación especial, susceptibles a un aprovechamiento sostenible. C, Zonas de regulación común, para aprovechamiento agrícola y explotación de canteras.

Un segundo elemento determinante en la modificación de los usos del suelo en la cuenca de trabajo es la utilización de los espacios naturales, y concretamente, la legislación que regula los usos del suelo en el parque de Sierra María- Los Vélez. Este parque, se declaró como tal el 16 de Octubre de 1987, y desde entonces la legislación referente a los usos del suelo ha sido

modificada hasta en cuatro ocasiones: según la ley 2/1989 del 18 de Julio de 1989, El Plan de Ordenación de Recursos Naturales (PORN) de 1994 (Agencia-de-Medio-Ambiente, 1994), el Decreto 199/1995 del 1 de Agosto de 1995, y el PORN de Noviembre de 2005 (Agencia-de-Medio-Ambiente, 2005). Las diferencias entre los distintos planes de ordenación territorial han llevado a la modificación de las categorías de protección dentro del parque, cuyos cambios se indican en la Figura 4.22.

El parque natural no se encuentra en su totalidad dentro de la cuenca de estudio. No obstante, la gestión del terreno en el parque, puede dar una idea aproximada de la influencia que tienen los factores sociales y ambientales sobre la planificación general del suelo en la cuenca. Se observa que entre los mapas referentes a los dos planes de ordenación existe una modificación de la zonación, más simplificada en 2005 que en 1994. No obstante, los cambios no se limitan a la reclasificación de las sub-categorías a categorías más generales, sino que si se comparan los documentos de planificación territorial de 1994 (Agencia-de-Medio-Ambiente, 1994) y 2005 (Agencia-de-Medio-Ambiente, 2005), se detecta que entre ambos mapas existe un cambio de criterio respecto a la regulación de la zonificación.

En la normativa de 1994 (Agencia-de-Medio-Ambiente, 1994) se definen las zonas de protección de grado A como: A1, aquellas que corresponden a ecosistemas excepcionalmente maduros y A2, zonas que corresponden a ecosistemas en evolución. En ambos casos se expone la necesidad de preservar estas zonas, excluyendo la actividad humana para su conservación. Las zonas de regulación de categoría B se definen como: B1, Formaciones boscosas debidas a sucesivas replantaciones ejecutadas en el parque. B2 formaciones boscosas replantadas que requieren urgentemente una nueva campaña de restauración hidrológico-forestal. La recalificación sufrida por las zonas de categoría B conjuntamente con alguna actividad antrópica que permita mantener el estado de conservación, determina que estas zonas se consideren como de categoría A. Por último, las zonas de regulación de categoría C se definen como: C1, Áreas de cultivos tradicionales; C2, áreas de protección común, que son espacios de vegetación natural, que carentes de interés medioambiental para su protección específica.

En la normativa de 2005 (Agencia-de-Medio-Ambiente, 2005) se definen las zonas de protección de grado A como zonas de reserva que deben de ser preservadas de los usos antrópicos, al igual que en la normativa de 1994. Las zonas de regulación de categoría B se definen como zonas de regulación especial en las que se incluyen zonas de bosque procedente de replantación (igual que en la normativa de 1994), y vegetación de repoblación natural y de antiguos campos de cultivos abandonados (que en la normativa de 1994 correspondía a C2). La legislación estipula que en estas zonas son susceptibles a un aprovechamiento sostenible. Por último, las zonas de regulación de categoría C se definen como zonas de regulación común, que se corresponden con zonas de aprovechamiento agrícola y otros usos antrópicos como la explotación de canteras (equivalente a la zona C1 de la nomenclatura de 1994).

Año	Zona A	Zona B	Zona C
1994	19.20%	29.47%	51.33%
1994 (2)	19.20%	67.51%	13.29%
2005	19.64%	65.14%	15.22%

Tabla 4.29: Porcentajes de terreno del parque natural de Sierra María-Los Vélez en función del grado de protección. Las superficies indicadas en 1994(2) corresponde al porcentaje de ocupación de 1994 adaptado a los grados de protección de 2005.

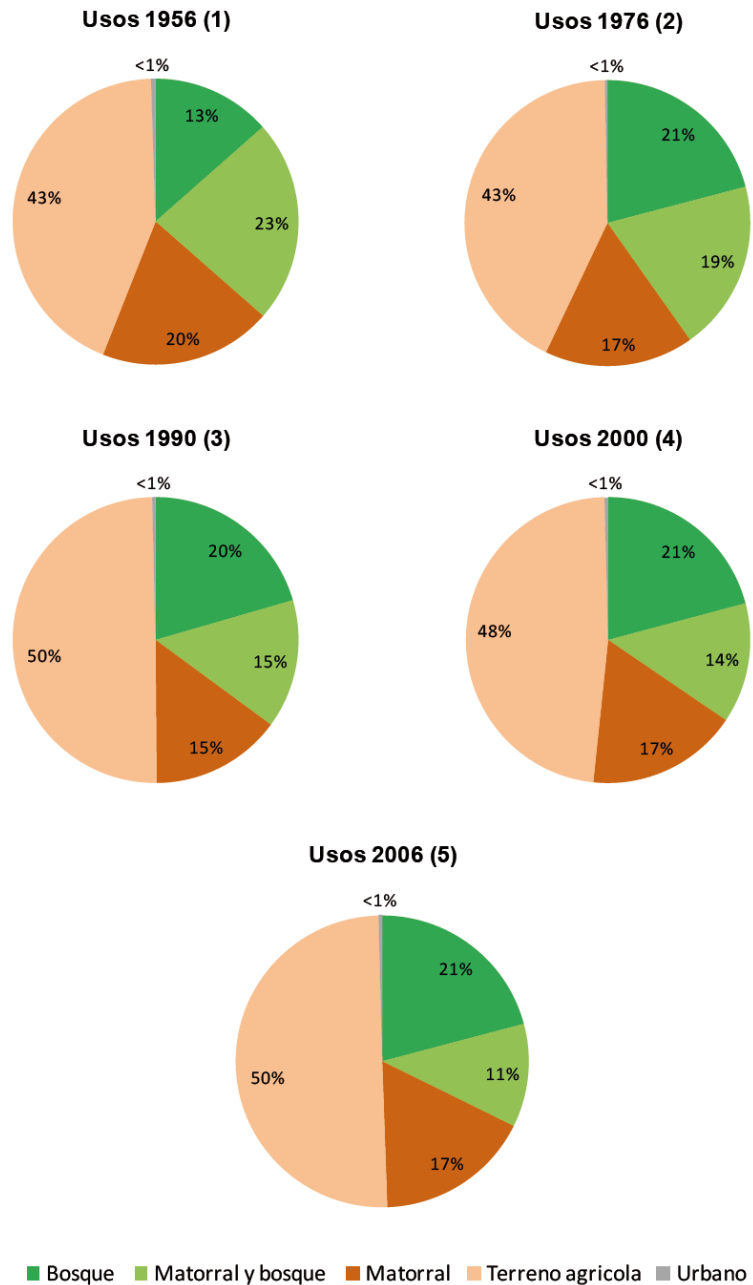


Figura 4.23 Porcentaje de cada uno de los tipos de usos del suelo considerados por el modelo TETIS y TETIS-SED, correspondientes a los mapas de usos y aprovechamientos del suelo de la Junta de Andalucía de 1956(1), del Ministerio de Agricultura de 1976(2), y del proyecto "CORINE land cover" de 1990(3), 2000(4) y 2006(5).

Los porcentajes de ocupación de las distintas categorías dentro del parque se sintetizan en la Tabla 4.29, en la que se observa que si se consideran las subcategorías de 1994 dentro de las categorías A, B y C, la diferencia entre la Zonas B y C de 1994 a 2005 es muy significativa. No

obstante, si se adapta la nomenclatura de 1994 a las modificaciones en la zonificación de 2005 (C2 forma parte de B), se observa que a efectos prácticos se ha reducido la zona de protección B y se han aumentado tanto la zona de protección A como la de C. Esto significa que pese a que se ha aumentado la zona de protección total, existen más zonas de vegetación natural con el mínimo grado de protección en la normativa de 2005 que en la de 1994.

Con el objetivo de discutir la evolución del suelo de la cuenca y poder modelizar distintos escenarios, se ha calculado el porcentaje de cada tipo de ocupación del terreno para cada uno de los usos de los distintos periodos de los que se dispone de información (Figura 4.3, Figura 4.23 y Tabla 4.30). Independientemente de los usos específicos del suelo y de su distribución espacial, en los datos de la ocupación del terreno en la cuenca de Valdeinfierno se pueden definir dos unidades de usos principales. Por un lado existen las extensiones que se pueden denominar naturales, que consisten en zonas boscosas (árboles), zonas de matorral y zonas con presencia de árboles y matorrales (en adelante zonas mixtas). Por otro se encuentran las zonas de aprovechamiento humano, que consisten en las zonas que se destinan a uso agrícola o urbano.

En general, existe una tendencia a aumentar las zonas de aprovechamiento humano (principalmente agrícola) en detrimento de las zonas naturales (Figura 4.23, Tabla 4.30). Entre los usos de 1956 (1) y los usos de 1976 (2), se producen cambios importantes en las zonas denominadas naturales. Consistente en una importante disminución del porcentaje de suelo destinado a matorral y zona mixta, en beneficio de la superficie de terreno ocupada por bosque. El aumento de porcentaje de bosque se mantiene más o menos constante desde los usos de 1976 (2) hasta 2006 (5) con una pequeña disminución (~1%) en los usos de 1990 (3). El porcentaje de superficie de matorral disminuye entre 1956 (1) y 1990 (3), mientras que entre el año 2000 (4) y 2006 (5) se mantiene constante.

En cuanto a las zonas de aprovechamiento agrícola, se observa un aumento significativo entre 1976 (2) y 1990 (3), y una ligera reducción en 2000 (4), que se recupera en 2006 (5). El porcentaje destinado al terreno urbano nunca sobrepasa el 1% del total, aunque es muy próximo a este valor en los escenarios de 1990 (3) y 2000 (4).

Año	Cambio detectado en los usos del suelo respecto al periodo anterior				Posible causa socio-económica	Escenario
1956	Entre 1940 y 1956 se repuebla el 3.97% de la cuenca y se adquiere el 6.82% para utilidad pública				Preservación capacidad embalse de Valdeinfierno	PT (Preforestal- Tradicional)
1976	Bosque Matorral mixta	+8% -3% -4%	Urbano Agrícola	< =	Preservación capacidad embalse de Valdeinfierno	TF (Tradicional- Forestado)
1990	Bosque Matorral mixta	-1% -2% -4%	Urbano Agrícola	= +7%	Programas de ayudas de la CEE. Subvenciones a la producción agrícola	PAC-PA (Producción agrícola)
2000	Bosque Matorral mixta	+1% +2% -1%	Urbano Agrícola	= -2%	Reforma PAC de 1992. Subvenciones a prácticas extensivas incluyendo barbecho blanco. 1º PORN P.N. Sierra María-Los Vélez	PAC-BB (Barbecho blanco)
2006	Bosque Matorral mixta	= -3%	Urbano Agrícola	> +2	Reforma PAC DE 2003. Subvenciones a buenas prácticas agrícolas (BPA), protección y conservación rural 2º PORN P.N. Sierra María-Los Vélez	PAC-BPA (Buenas prácticas agrícolas)

Tabla 4.30: Tabla resumen de las distintas políticas territoriales que afectan a la cuenca de Valdeinfierno.

Desde una perspectiva histórica, la deforestación ocurrida a finales del siglo XIX (Anonymous, 1891a), que afectó al 34.4% de la extensión de los municipios de María y los Vélez (80% de la cuenca) no se ha recuperado durante el siglo XX, a pesar de las campañas de reforestación y la protección ambiental en el Parque Natural de María-Los Vélez (Araque Jiménez, 2009).

Otro hecho significativo desde el punto de vista de la gestión del suelo es la adquisición por parte de la administración pública del 27% de la superficie de la cuenca de Valdeinfierno para la repoblación forestal, aunque finalmente tan solo se reforesta el 7% de la cuenca (Araque Jiménez, 2009).

Es lógico pensar que los terrenos adquiridos en su momento por la administración para la reforestación, con el paso del tiempo, se van colonizando por especies arbustivas, lo que coincide aproximadamente con el porcentaje de zonas de matorral en la cuenca (15-20%), sustrayendo a la zona de utilidad pública (27.5%) la parte reforestada (7.09%).

la demografía se puede considerar un indicador de la presión antrópica sobre el territorio, determinante en los cambios de usos del suelo. Los datos de la población de María y los Vélez proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística (INE) indican un descenso de demografía desde 1950 con 9843 personas censadas, a 8609 y 6858 en 1960 y 1970 respectivamente, lo que indica una clara tendencia decreciente anterior al periodo representado en la Figura 4.24.

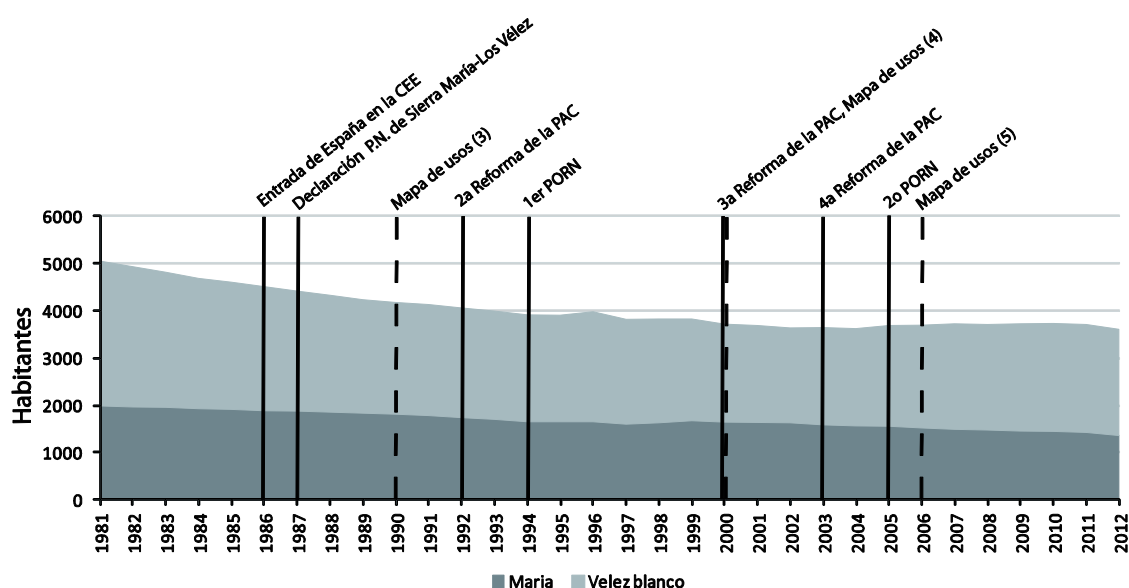


Figura 4.24 Evolución demográfica de las poblaciones de María y Vélez-Blanco, desde 1981 hasta 2012 en la que se resaltan las distintas fechas en las que se han producido modificaciones en la política agraria común (PAC) referentes a las ayudas a la agricultura de los países miembros, fechas de modificación del PORN y fechas de toma de los datos de usos del suelo.

Los resultados de la Figura 4.23, la Tabla 4.30, y la Figura 4.24, presentan fluctuaciones en función de las políticas territoriales, tal y como se refleja entre 1976 y 1990. En este periodo se observa un aumento significativo del suelo destinado a cultivos, con motivo del aumento de

rentabilidad debido a los programas de ayuda a la agricultura de la PAC, vigentes desde la entrada de España en la Comunidad Económica Europea (CEE) (PAC-PA, Tabla 4.30). Durante este periodo se observa igualmente una progresiva ralentización de la disminución demográfica y, por tanto, de estabilidad en el censo poblacional (Figura 4.24)

Sin embargo, la modificación de la PAC de 1992 (PAC-BB, Tabla 4.30), perjudica a los pequeños terratenientes ya que no disponen de tierra suficiente para cultivos extensivos (Oñate et al., 1998). Dado que una buena parte de los cultivos de la zona de Valdeinfierno son de pequeña extensión, la reforma de la política conlleva la disminución del área cultivada en la cuenca, tal y como se refleja en la diferencia entre los usos de 1990 y 2000 (Figura 4.23, Tabla 4.30) y se puede extraer de la Tabla 4.29. No obstante, en la Figura 4.24 se observa una importante atenuación de la pérdida demográfica en las poblaciones, e incluso una pequeña recuperación, sobre todo después del primer PORN (de 1994). Este estancamiento demográfico puede ser debido a la necesidad de mano de obra para la producción extensiva de los terrenos, y/o el aumento de la oferta laboral ligada a la reforma del parque de Sierra María-Los Vélez.

En el año 2000 se produce otra reforma de la PAC, en la que se decide invertir en el desarrollo rural. Posteriormente se implementa una nueva reforma parcial en 2003 en la que se desvinculan las ayudas agrarias a la producción (PAC-BPA) (Tabla 4.30), a lo que se suma una modificación del plan de ordenación, permitiendo más actividades antrópicas en las áreas del parque. Estos cambios en las políticas, pueden explicar la recuperación de zonas agrícolas que se observa entre los usos del 2000 y 2006 (Figura 4.23), y también la estabilización (e incluso una ligera recuperación) demográfica en la zona (Figura 4.24).

4.3.2. Variaciones de la hidrología en función de los cambios en los usos del suelo

En este apartado se aborda la influencia de los tipos de uso de suelo recientes en la producción de sedimento. Para ello, se han mantenido fijos todos los parámetros de la modelización para los diferentes periodos temporales modelados, variando exclusivamente los usos del suelo. El objetivo consiste en determinar el comportamiento hidrológico-sedimentario de la cuenca para los periodos modelizados según los distintos tipos de usos de suelo históricos independientemente (de 1971 a 2012; Figura 4.25).

La principal característica que se aprecia en la Figura 4.25 es la poca diferencia entre los resultados de los distintos escenarios de usos del suelo dentro de cada uno de los periodos simulados. Este resultado es coherente con los escasos cambios de usos en los suelos, descritos anteriormente (Figura 4.23), aunque sí existen algunos matices. En el apartado anterior, se ha expuesto que para todos los periodos de simulación, la esorrentía mínima acumulada corresponde a los usos de 1976 (2), que contienen la mayor proporción de bosque respecto a cultivos de toda la serie, conjuntamente con los usos de 1956 (1) que presentan la mayor

cobertura de vegetación natural. Los usos de 1956 (1) generan los mayores valores de volumen de escorrentía (Figura 4.25)

El máximo en la Figura 4.25 de los usos de 1956 (1) se debe a la baja proporción de bosque, combinado con precipitaciones en periodos con escasa protección en el ciclo de la vegetación (Figura 4.4). Estas observaciones llevan a la conclusión de que es más importante, en términos de conservación, reducir el porcentaje de tierras de cultivo, que aumentar el de bosque. En cuanto a los picos de caudal, las diferencias entre escenarios son mínimas, a excepción de las ya expuestas sobre el escenario de 1976 (2) en los periodos p1 y p6, y del periodo p1 donde se observa que el escenario de usos de 2006 (5) es ligeramente superior a los demás, probablemente por los mismos motivos, ya desarrollados, por los que su volumen de transporte es máximo.

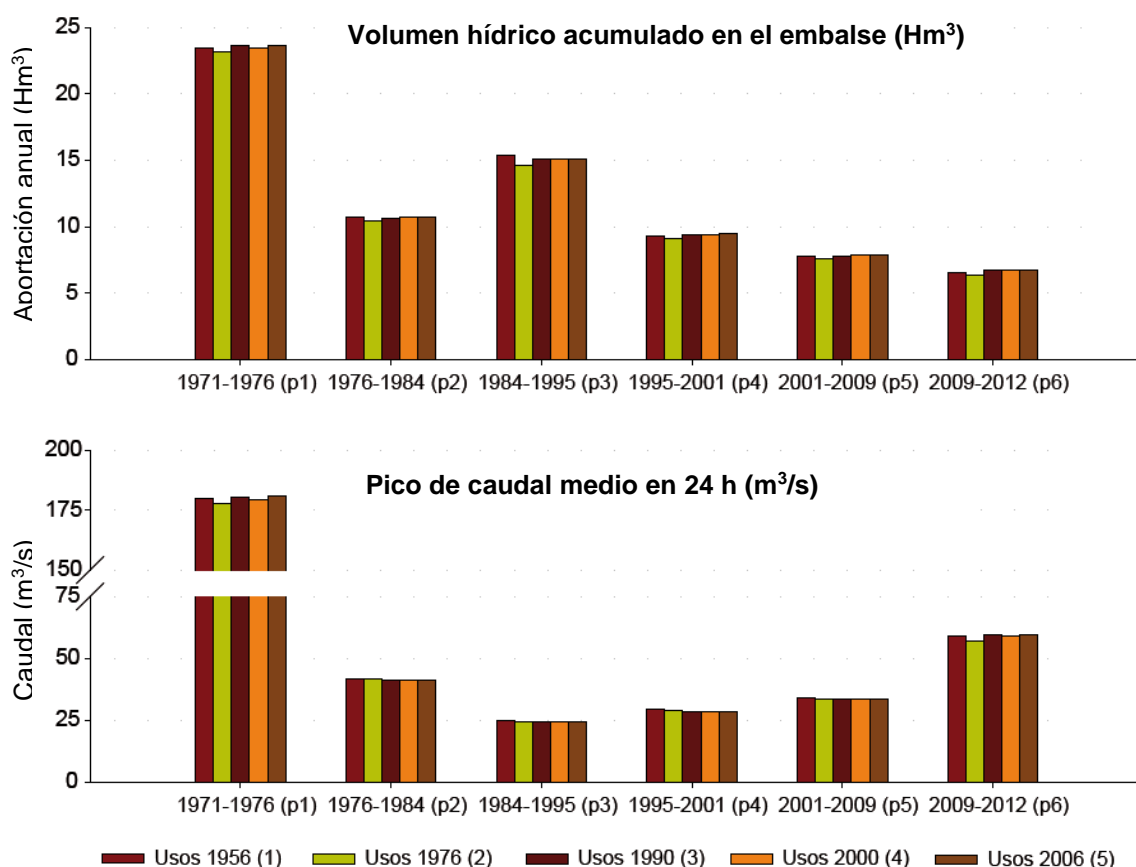


Figura 4.25 Volumen de escorrentía acumulado en el embalse y pico máximo de caudal de agua, en cada uno de los periodos de simulación considerados, para cada uno de los escenarios de usos del suelo.

Otra característica que se observa en los resultados presentados en la Figura 4.25, es la falta de proporcionalidad entre las variaciones en el volumen de escorrentía total y los picos máximos de cada periodo. Esta diferencia resulta más patente en los periodos p3 y p6, para todos los escenarios de uso, y a priori, no tiene relación con los usos del suelo, ya que afecta a todos los escenarios de forma semejante.

Esta diferencia de comportamiento entre volumen total y pico de escorrentía se explica por las características de la intensidad de precipitación, y la presencia de lluvias extremas (e.g. periodo 6) o su ausencia (e.g. periodo 3).

Los resultados de la simulación hidrológica muestran que el escenario de usos de 1976 (2) genera el menor volumen de escorrentía anual y los picos más atenuados en todos los periodos, aunque con escasa diferencia respecto al resto.

El análisis de los resultados del módulo sedimentológico TETIS-SED muestra que el transporte de sedimentos es mucho más susceptible a los cambios en los usos de los suelos que la hidrología (Figura 4.26), indicando una gran influencia de los pequeños cambios en los usos sobre la erosión. El volumen mínimo de producción de sedimento anual y el pico menor en todos los periodos coinciden con el escenario de usos de 2000 (4). Este escenario presenta el mayor porcentaje de vegetación natural desde 1976 (Figura 4.23, Tabla 4.30). Por otro lado, el pico máximo de sedimento y volumen máximo de transporte en el periodo p1 se corresponden a el escenario de usos de 1976 (2), y que se ha descrito como los usos que generan menos escorrentía (Figura 4.25).

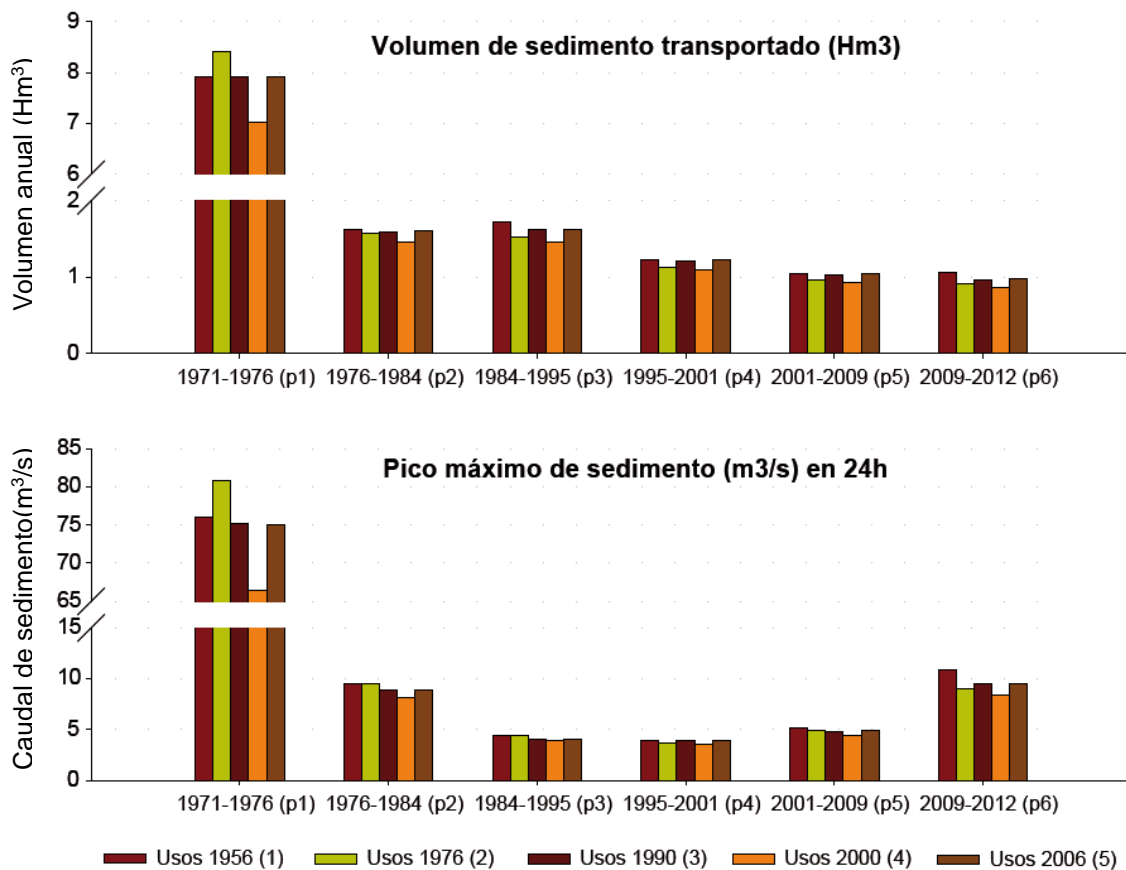


Figura 4.26 Volumen de sedimento transportado y pico de caudal de sedimento transportado en cada uno de los periodos de simulación considerados, para cada uno de los escenarios de usos del suelo.

La causa del distinto comportamiento de la hidrología y de la producción de sedimento, no se explica en relación a los porcentajes de cada tipo de uso del suelo, sino por la situación de

algunos usos (agrícolas y matorral) en zonas de elevada pendiente. En múltiples trabajos se identifica la importancia de la pendiente en la erosión (Horton, 1945; Flanagan y Nearing, 1995) y como afecta a este proceso los distintos tipos de vegetación (Wainwright, 1996; Castillo et al., 1997; Romero-Díaz et al., 2010)

	Usos 1956 (1)	Usos 1976 (2)	Usos 1990 (3)	Usos 2000 (4)	Usos 2006 (5)
Vol total de agua (Hm³)	73	71	73	73	73
Pico máx. agua (m³/s 24h)	180	178	180	179	181
Vol total de sed. (Hm³)	15	14	14	13	14
Pico máx. sed. (m³/s 24h)	76	81	75	66	75

Tabla 4.31: Comparación del volumen total y pico máximo, para caudal líquido y sedimentario a lo largo de todo el periodo instrumental, entre los distintos escenarios de usos del suelo.

Desde finales del siglo XIX, las zonas prioritarias de repoblación forestal de la cuenca, se han centrado en zonas de cabecera de la cuenca y las laderas con mayor pendiente (Montiel Pinilla, 1955; Araque Jiménez, 2009). Los mapas de usos del suelo constatan que desde 1956 se ha recuperado masa forestal en las zonas altas, mientras que se ha reducido o mantenido en las zonas bajas. (Figura 4.22). Por tanto, desde el punto de vista de la conservación del suelo resulta más importante la ubicación de determinados tipos de usos (e.g. cultivos y bosques) que su proporción a escala de cuenca. Otra conclusión interesante de este estudio comparado con el comportamiento escorrentía-sedimentos, es el papel atenuador del volumen y pico de escorrentía que aparentemente ejercen las vegetaciones de bosque y mixto en las partes bajas de la ladera, aunque no influyen de manera importante en la producción de sedimentos que se genera en las partes altas y las laderas de elevada pendiente de la cuenca.

La combinación de los resultados de la hidrología y la sedimentología también evidencian que no se puede determinar ni gestionar el mejor escenario de usos del suelo simplemente con la hidrología, ya que existen factores ambientales que afectan a la producción de sedimentos y no a su transporte.

La falta de una tendencia clara de un escenario máximo y mínimo común para todos los periodos de simulación ha llevado a la comparación de los resultados para todo el periodo instrumental mediante sus valores característicos (Tabla 4.31), y sus volúmenes acumulados tanto de caudal líquido como de sedimentos (Figura 4.27).

Los resultados del volumen acumulado de escorrentía muestran que el escenario 2006 (5) produce los máximos de volumen de transporte y pico mientras que el de 1976 (2) produce los mínimos, existiendo pocas variaciones de la hidrología en función del escenario. La justificación de los resultados es la misma que ha sido discutida para los resultados de la Figura 4.25. No obstante, en la Figura 4.27, se aprecia que la curva acumulativa de volumen de agua que llega al embalse, es menor para los usos de 1976 (2), que se separa progresivamente de las curvas de los demás escenarios. Esta diferencia en la escorrentía apoya la hipótesis de que la distribución de los usos del suelo en 1976 (2) con mayor vegetación en partes bajas de la cuenca, facilita la ralentización del flujo y la percolación del agua, limitando su llegada al embalse.

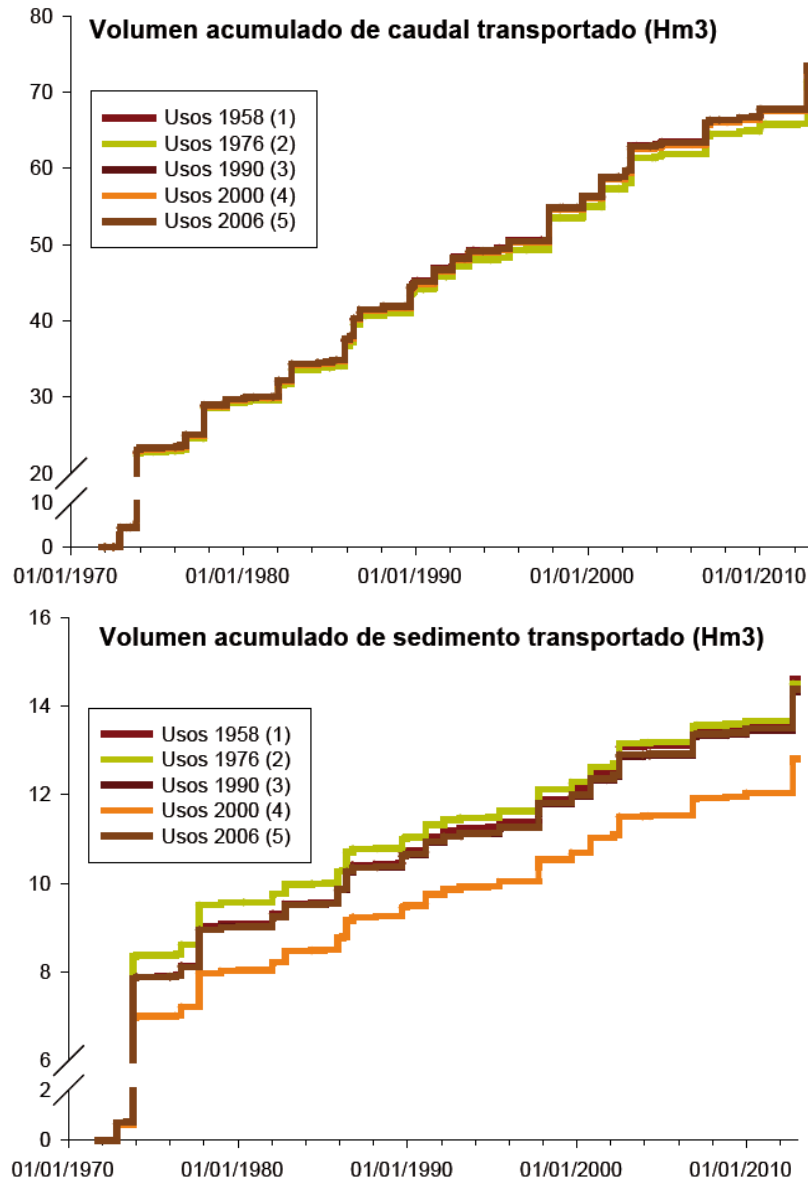


Figura 4.27 Volumen de agua y sedimento acumulado en el embalse de Valdeinfierno para cada uno de los distintos escenarios de usos del suelo, a lo largo de todo el periodo instrumental.

En relación a la producción de sedimento, se observa que el pico de volumen de transporte y de caudal para el periodo de máximo aporte (p1) coincide con el escenario de usos de 1976 (2), aunque en el cómputo final de sedimento transportado el escenario de usos de 1956 (1) produce un volumen de sedimento mayor. Este resultado indica que a pesar de que durante un evento máximo la configuración de usos en la que se produce mayor transporte de sedimentos es la de 1976 (2), debido al régimen de la cuenca, el escenario de usos de suelo más desfavorable en cuanto a la conservación de suelo es el escenario de 1956 (1). En definitiva, el escenario de 1956 (1) produce más transporte de sedimentos durante eventos menores, lo que probablemente se debe a que contiene mayor proporción de zonas arbustivas en las partes altas de la cuenca y en las laderas de todos los escenarios considerados. Por lo tanto, la presencia de matorral en zonas de cabecera y ladera protege relativamente bien el terreno frente a la erosión

durante eventos de gran magnitud, pero presenta una pérdida de suelo muy superior a ambientes ecológicos más desarrollados (mixto y bosque) en eventos de poca magnitud.

Otro comportamiento interesante lo presenta la curva del escenario de 2000 (4) que en cuanto a producción acumulada de sedimento se separa progresivamente como consecuencia de la reducción de transporte durante los eventos grandes.

Debido a las diferencias observadas entre los resultados hidrológicos y sedimentológicos, se ha decidido analizar estadísticamente su interdependencia. Para ello se ha considerado como variables cada uno de los valores característicos resultantes de las simulaciones para todo el periodo instrumental, en función de los distintos escenarios de usos del suelo. La correlación entre variables se ha analizado utilizando el coeficiente de correlación bilateral de Pearson, que permite definir la significatividad entre variables, y el grado de correlación entre los valores de las series (Tabla 4.32).

		Q Líquido	Vol. sed.	Q sed.	Q max
Vol. agua	Correlación de Pearson	0.802	0.919	0.861	0.672
	Sig. (bilateral)	1.01079E-07	7.98922E-13	9.84408E-10	4.84233E-05
Q Líquido	Correlación de Pearson		0.961	0.988	0.895
	Sig. (bilateral)		3.48415E-17	2.00748E-24	2.40831E-11
Vol. sed.	Correlación de Pearson			0.990	0.804
	Sig. (bilateral)			1.65295E-25	8.95936E-08
Q sed.	Correlación de Pearson				0.851
	Sig. (bilateral)				2.46383E-09

Tabla 4.32: Determinación de la dependencia estadística según el coeficiente de correlación bilateral de Pearson y su significatividad, entre los resultados de las simulaciones hidrológica y sedimentológica, considerando los distintos usos del suelo a lo largo de todo el periodo instrumental.

Los resultados de la Tabla 4.32 indican que todas las variables (valores característicos de los distintos usos del suelo) son dependientes entre sí. Este resultado es lógico ya que todos los valores son extraídos de los resultados de la simulación hidrológica (ya que la simulación sedimentológica depende de la hidrológica). No obstante, se observa que no todas las variables se correlacionan con igual valor.

Las correlaciones con índices altos (>0.85; Tabla 4.32) indican una alta dependencia entre las variables, algunas evidentes, como que el volumen de sedimentos depende del volumen de agua. Este análisis muestra como el caudal de sedimento depende del caudal líquido (Q líquido), y en menor medida del evento máximo (Q max) y el volumen de agua (Vol. agua). Estos resultados refuerzan la hipótesis ya planteada, que los usos del suelo en los que se frena el caudal líquido y se limita el volumen de sedimento en cabecera de las cuencas, son los que minimizan el transporte de sedimentos.

Uno de los objetivos planteados en el presente apartado es el de analizar el efecto que tienen los porcentajes de los distintos tipos de usos del suelo sobre la hidrología y la sedimentología. Con este fin, al igual que para los distintos valores característicos en la Tabla 4.32, se ha calculado el coeficiente de correlación bilateral de Pearson entre las series de resultados característicos y el porcentaje de los usos del suelo contenidos en cada uno de los escenarios temporales (Figura 4.23, Tabla 4.30, Tabla 4.33).

		Vol. agua	Q líquido	Vol. sed.	Q sed
Bosque	Correlación de Pearson	-0.177	-0.357	-0.212	-0.158
	Sig. (bilateral)	0.350	0.053	0.261	0.405
Matorral & Bosque	Correlación de Pearson	-0.379	0.085	0.257	0.288
	Sig. (bilateral)	0.039	0.656	0.170	0.123
Matorral	Correlación de Pearson	0.022	0.199	0.068	0.068
	Sig. (bilateral)	0.908	0.292	0.723	0.720
Usos Naturales	Correlación de Pearson	-0.656	-0.123	0.177	0.268
	Sig. (bilateral)	0.000	0.516	0.351	0.152
Agrícola	Correlación de Pearson	0.642	0.112	-0.177	-0.266
	Sig. (bilateral)	0.000	0.554	0.350	0.155
Urbano	Correlación de Pearson	0.656	0.456	-0.005	-0.102
	Sig. (bilateral)	0.000	0.011	0.981	0.591

Tabla 4.33: Determinación de la dependencia estadística según el coeficiente de correlación bilateral de Pearson y su significatividad, entre los distintos tipos de usos del suelo en la cuenca de Valdeinfierno y los resultados de las simulaciones hidrológica y sedimentológica.

De la comparación de los valores hidrológicos característicos y los porcentajes de usos del suelo (Tabla 4.33), se extrae que el volumen de agua transportado hasta el embalse es negativamente dependiente de los porcentajes de usos naturales, y positivamente dependiente de los usos agrícola y urbano. Esta relación corrobora la evidencia de que a mayor porcentaje de vegetación arbórea y uso mixto menor es el volumen de agua que llega al embalse, y por contra, cuanto mayor es el porcentaje de terrenos agrícolas, mayor es la escorrentía generada en la cuenca.

Considerando los resultados combinados de la Tabla 4.32 y la Tabla 4.33, se puede argumentar que puesto a que el volumen de agua se correlaciona linealmente con los usos del suelo y con los demás valores de simulación, existe una correlación no lineal entre los valores resultantes de las simulaciones hidrológicas y sedimentológicas, y los usos del suelo. La comparación estadística entre distintos escenarios de usos del suelo ha permitido valorar y discutir la eficiencia de los cambios producidos en la cuenca durante el periodo instrumental, así como plantear escenarios alternativos de evolución. No obstante se debe incidir en que las políticas de gestión de los suelos no se deben limitar a esta comparación numérica, ya que uno de los factores que más influyen en la dinámica hidrológica y sedimentológica es la distribución espacial de los suelos y sus usos.

4.3.3. Discusión sobre la influencia de la gestión del territorio en los procesos hidrológicos.

Las distintas políticas de usos del suelo de una cuenca determinan el comportamiento hidrológico y sedimentológico de una cuenca. En el presente sub-apartado se ha discutido como han influido los distintos cambios históricos de los usos del suelo sobre su comportamiento, y cuales hubiesen sido los efectos de mantener estos usos a lo largo de todo el periodo instrumental.

El análisis de la evolución de los usos del suelo muestra que pese a las problemática de erosión y avenidas detectadas en la cuenca desde hace más de dos siglos, las zonas de protección natural

(excepto las zonas de bosque) se han visto reducidas en el tiempo frente a las zonas de producción agrícola. Se ha simulado la hidrología y la producción de sedimentos para distintas cartografías de usos del suelo (1956 -2006) usando todo el registro meteorológico disponible (1971-2012), lo que ha permitido comparar las distintas políticas de usos del suelo históricas y poder detectar aquellas más favorables en términos de conservación.

La comparación entre escenarios ha puesto de relieve que existen diferencias entre el comportamiento hidrológico y sedimentológico de la cuenca, ya que los resultados del transporte de sedimentos son mucho más susceptibles a los cambios de uso del suelo que los resultados de la hidrología.

Los resultados de la correlación conjuntamente con los resultados de las simulaciones con las distintas cartografías de suelos permiten afirmar que mientras que la hidrología de la cuenca es dependiente de los porcentajes de usos del suelo, la sedimentología es dependiente de la ubicación espacial de dichos usos.

Las simulaciones con las distintas cartografías de usos del suelo han permitido determinar la relación entre los usos de suelo, y la erosión en la cuenca y comprobar el grado de dependencia de la producción de sedimento respecto a la pendiente de ladera y la vegetación. Respecto a la hidrología, se ha observado que una vegetación más madura en las partes bajas de una cuenca, regula y ralentiza el volumen de agua y el pico máximo de agua que circulan por esta, aunque no influyen de manera importante en la producción de sedimentos que se genera en las partes altas y las laderas de la cuenca.

Comparando el comportamiento de las simulaciones con las políticas de usos de suelo desarrolladas en la cuenca, se observa que las distintas campañas de repoblación forestal se han centrado en áreas de altas pendientes y cabecera, por lo que, pese a la limitada recuperación de las áreas forestales, se ha conseguido una ligera mitigación de los efectos de las avenidas a lo largo del periodo instrumental.

4.4. Conclusiones

La fiabilidad del modelo hidrológico TETIS se ve condicionada por un conjunto de factores relacionados con la longitud temporal de los intervalos escogidos para la simulación, la fiabilidad de los datos de observación y la magnitud, duración, distribución temporal y número de los picos de caudal.

La mayor fiabilidad del modelo TETIS en la cuenca de Valdeinfierno, se consigue en periodos de tiempo de simulación relativamente cortos, con picos de caudal de magnitud importante. La menor se produce en los intervalos largos con caudales máximos de poca magnitud.

El modelo TETIS es un modelo adecuado para simular de forma fiable el comportamiento hidrológico, efímero y torrencial, de la cuenca de Valdeinfierno, aunque tiende a subestimar los picos máximos y el volumen de transporte total respecto a los datos de observación.

El modulo sedimentológico TETIS-SED determina el transporte de sedimentos a partir de la simulación hidrológica del modelo TETIS, por lo que simula la erosión en función de los picos de caudal líquido determinados por dicho modelo. La calibración y validación del modelo, constituye un paso metodológico importante, que se ha conseguido mediante la estimación de sedimento acumulado en diques de retención. Una vez calibrado, el modelo TETIS-SED ha sido capaz de simular los procesos sedimentológicos a distintas escalas dentro de una cuenca, con una fiabilidad muy buena.

Los de lluvias intensas de gran magnitud son los procesos naturales más determinantes en el transporte de sedimento y en la morfodinámica de la cuenca de Valdeinfierno. El aumento de caudal en la cuenca no se refleja únicamente en un aumento de la capacidad de transporte de sedimento en el cauce, sino que también se refleja en un aumento la capacidad erosiva de los procesos hidrológicos en las laderas.

La simulación de la producción de sedimentos sin considerar su distribución espacio-temporal y volumen generado por evento tiende a distribuir el valor de los picos máximos de erosión a lo largo de los años de observación, dando como resultado una media poco representativa de la naturaleza del proceso en ríos efímeros dominados por los eventos.

En términos de conservación tiene mayor importancia la reducción del porcentaje de tierras de cultivo y áreas expuestas a la erosión, que el aumento del porcentaje de bosque. La configuración de usos de 1976 (2) se puede considerar como el escenario óptimo para la mitigación de las avenidas de los existentes durante la segunda mitad del siglo XX, ya que genera los menores volúmenes de escorrentía y los picos de avenida menores durante los eventos extremos.

La hidrología de la cuenca es dependiente de los porcentajes de usos del suelo mientras que la de sedimento depende de su distribución espacial. Por este motivo, la gestión hidrológica-forestal debe de considerar los parámetros de distribución de usos del suelo que minimicen la erosión en la cuenca.

Capítulo 5: Hidrología y producción de sedimentos en respuesta a escenarios de cambio climático y de usos del suelo

Introducción

El cambio climático de origen antropogénico afecta a los procesos de circulación atmosférica y oceánica global, y por lo tanto, a todos los fenómenos físicos que dependen de estos procesos (IPCC, 2007b, 2013). El cambio en el clima implica modificaciones en variables como la temperatura, la lluvia y sus patrones, o la cobertura de nubes, resultando en impactos múltiples sobre el medio natural y las actividades humanas (IPCC, 2007a). Existen dos características inherentes al cambio climático actual. Por un lado, las tasas de calentamiento global son muy superiores a las producidas durante el Cuaternario (2.5 Millones de años) y, por otro, la complejidad del problema donde las emisiones de gases constituyen un forzamiento adicional en las interacciones de los sistemas naturales Tierra-Atmósfera-Océano. Ante la falta de precedentes históricos, el estudio de estos cambios y sus impactos en el futuro se aborda mediante modelos físicos que simulan la naturaleza caótica de la atmósfera en base a proyecciones de emisiones de gases, los denominados escenarios de cambio climático (Nakicenovic et al., 2000).

La zona mediterránea resulta particularmente sensible al cambio climático debido a su situación en la interfaz de los climas subtropical y templado. En la región Mediterránea de la Península Ibérica, el cambio climático ha supuesto un aumento considerable de las temperaturas máximas (Brunet et al., 2007; Rodríguez-Puebla et al., 2010) y ha producido cambios importantes en los regímenes de precipitación (Ramos, 2001; del Rio et al., 2011). En concreto, en la parte sur de la Península Ibérica se ha observado una reducción de la precipitación media anual y el incremento de las lluvias máximas (García et al., 2007; Rodrigo, 2010) que podría generar una progresiva desertificación (Gao y Giorgi, 2008). A nivel de cuenca hidrológica, el aumento de la intensidad de la precipitación y la menor protección del suelo, debido a la pérdida de cobertura vegetal por la desertificación, parece apuntar a una magnificación de la erosión (Martínez-Mena et al., 2001; Baartman et al., 2012). Sin embargo, las incertidumbres asociadas a estas proyecciones son muy elevadas y los condicionantes locales y de cuenca (suelos, vegetación, morfología) pueden ser determinantes en el comportamiento de la erosión y la producción de sedimento. En este capítulo se pretende evaluar las tendencias en la tasa de producción de sedimento en relación con diferentes escenarios de cambio climático, y como estos cambios pueden ser magnificados o reducidos por la gestión territorial y de uso del suelo. En este análisis se tendrán en cuenta las incertidumbres introducidas por la aplicación de diferentes modelos climáticos conforme a las emisiones futuras de gases de efecto invernadero contempladas en los escenarios de cambio climático.

Los objetivos concretos de este capítulo son:

- Recopilar las series de reanálisis que definen los principales parámetros atmosféricos y sinópticos que determinan la precipitación y la temperatura a escala regional.
- Crear series meteorológicas sintéticas en base a series de reanálisis, ajustadas con los registros instrumentales de la zona de estudio.
- Aplicar a las series sintéticas las anomalías calculadas en los escenarios de cambio climático, y modelar la respuesta futura de la hidrología y la producción de sedimento en la cuenca de estudio.
- Analizar el efecto combinado de distintas proyecciones de usos del suelo y de escenarios de cambio climático en la hidrología y la erosión a escala de cuenca.

5.1. Influencia de las variables climáticas

Los modelos climáticos proporcionan proyecciones de las condiciones climáticas futuras bajo distintos escenarios de desarrollo socio-económico y tecnológico. La mayor parte de estos modelos climáticos globales realizan estas proyecciones considerando unidades del terreno (celdas) del orden de cientos de kilómetros cuadrados, por lo que se hace necesario reducir la escala (aumentar la resolución) de los modelos para su aplicación a nivel regional y de cuenca hidrológica (Christensen et al., 2007). Los métodos empleados para aumentar esta resolución de escala se agrupan en dos tipos: dinámicos y estadísticos. Los primeros se basan en el desarrollo de modelos climáticos de mayor resolución, incorporando los procesos de circulación atmosférica y la topografía local (Christensen et al., 2007). Los segundos utilizan técnicas de modelado estadístico para la extrapolación y la interpolación de los resultados generados por los modelos dinámicos (Benestad et al., 2008). En esta tesis doctoral se ha utilizado un modelo de reducción de escala climática (*downscaling*) estadístico, con el objetivo de generar unas variables meteorológicas sintéticas a escala local.

La generación de las variables meteorológicas sintéticas (precipitación y temperatura) se ha obtenido mediante el modelo de reducción climática GLIMCLIM (Chandler y Wheeler, 2002; Yan et al., 2002; Yang et al., 2005; Yan et al., 2006) que considera la influencia de los datos de circulación climática de base y la interrelación entre las estaciones de medida (factor orográfico), de forma que los resultados de las variables sean representativos tanto de la zona de estudio como de su climatología. En un primer paso se investigan las relaciones de la variación meteorológica a escala diaria con otros componentes del sistema climático a escala sinóptica, obtenidos a partir de simulaciones de la circulación climática durante el periodo instrumental (reanálisis). Este paso se requiere para proyectar la influencia de los distintos escenarios de cambio climático futuro sobre las series meteorológicas, particularmente temperatura y precipitación.

En el presente apartado se presentan por un lado, las distintas variables sinópticas (atmosféricas) utilizadas para la reducción de escala, así como su relación con las series meteorológicas instrumentales y, por otro, como se generan series sintéticas de variables meteorológicas mediante *downscaling*, y que constituyen la base sobre las que se aplican las anomalías proyectadas por los modelos climáticos. Finalmente, se determinan las diferencias entre la respuesta hidrológica y la producción de sedimentos de las series sintéticas respecto a las series instrumentales.

5.1.1. Variables sinópticas determinantes para la reducción de escala

Se han seleccionado una serie de variables meteorológicas que han demostrado una relación con la precipitación a escala de cuenca y con buena representación en los modelos de circulación global. Las relaciones de interdependencia para la reducción de escala climática se han obtenido a partir de los datos mensuales de distintas variables atmosféricas simuladas por el modelo de reanálisis ERA-Interim (Dee et al., 2011), desarrollado por el centro Europeo de Predicción Meteorológica de Medio Rango (ECMWF). Este modelo de reanálisis atmosférico global constituye una actualización del modelo de reanálisis ERA-40 (Uppala et al., 2005), sobre el que se amplía la cobertura de variables desde 1979 hasta la actualidad.

5.1.1.1. Variables sinópticas de reanálisis

Las variables consideradas en el ERA-Interim, según Dee et al.(2011) y Uppala et al.(2005) se separan en ocho series de datos de análisis que consisten en: nivel de presión, nivel del modelo, nivel isoantrópico (campos tridimensionales de variables atmosféricas), nivel del potencial de vorticidad, predicción en superficie diaria, predicción de nivel de presión diaria y predicción de nivel de modelo diaria.

En estas series de datos de reanálisis del ERA-Interim se incluyen un total de 124 variables atmosféricas sinópticas generadas para una cobertura global y con una resolución de dato de 0.75 grados en longitud y latitud (~ 7000 Km²). Debido a la gran cantidad de variables y a la cobertura espacial de los datos se ha requerido restringir la recopilación de datos a las celdas incluidas en la cuenca de estudio.

La cuenca de Valdeinfierno se encuentra en la intersección entre cuatro celdas del ERA-Interim, por lo que inicialmente se ha procedido a establecer la influencia de las variables atmosféricas de reanálisis de cada una de estas cuatro celdas. Como se ha indicado anteriormente, la determinación de las variables de reanálisis que influyen sobre la meteorología en la cuenca de estudio se ha obtenido mediante el modelo GLICLIM, que se implementa en dos partes principales.

La primera parte, a la que llamaremos de calibración, consiste en la determinación de la influencia de cada una de las variables climáticas respecto a los datos meteorológicos instrumentales, y su parametrización mediante un modelo lineal generalizado (GLM). La segunda parte, expuesta en el sub-apartado siguiente y a la que llamaremos de *downscaling*, determina una serie de datos sintéticos para cada una de las estaciones meteorológicas consideradas, dependientes de las variables climáticas generalizadas de la primera parte, las características geográficas de cada estación meteorológica y las series de datos meteorológicos utilizadas en la calibración.

Para la parte de calibración se consideran dos estadios de aproximación siguiendo la descripción de Coe y Stern (1982) y Stern y Coe (1984).

- Estadio 1: Este estadio corresponde a un modelo de ocurrencia en el que se determina el patrón ocurrencia/no ocurrencia del fenómeno meteorológico ligado a cada una de las variables climáticas consideradas, mediante una regresión logística (Chandler y Wheeler, 2002).
- Estadio 2: Este estadio corresponde a un modelo de magnitud para los días de ocurrencia de fenómeno meteorológico (regresión logística), donde se ajusta un modelo de distribución gamma a la magnitud del parámetro meteorológico a estimar, determinado por la magnitud de la variable climática (Chandler y Wheeler, 2002).

Esta metodología de cálculo en dos estadios, supone una aproximación relativamente simple al problema de reducción de escala entre las variables de circulación atmosférica global y las series en las estaciones meteorológicas de la cuenca. Entre las principales limitaciones y consideración de este método de reducción de escala destacamos las siguientes.

- Para ambos estadios del GLIMCLIM requieren la introducción de series conocidas, tanto del fenómeno (instrumentales) como de series de variables climáticas (modelo de reanálisis ERA-Interim).
- Como consecuencia de la metodología de calibración, para cada intervalo de tiempo considerado deben existir siempre datos instrumentales en alguna de las estaciones meteorológicas. Igualmente, para poder generar variables meteorológicas sintéticas debe existir un solape directo, o a través de otra estación, de las series de datos de las estaciones.
- Debido a que el Estadio 2 determina la magnitud respecto a las series meteorológicas observadas introducidas como dato, los eventos puntuales de mayor magnitud dentro de las series simuladas siempre se van a producir estadísticamente en tiempos parecidos y en similar secuencia que en las series de entrada (observadas). Esta limitación cobra gran importancia si se pretenden aplicar distintas anomalías sobre un mismo periodo de referencia, ya que todas las series meteorológicas van a tener un aspecto similar.
- La cuenca de estudio se encuentra en la intersección entre cuatro de las celdas del modelo de reanálisis ERA-Interim. Debido a que el modelo GLIMCLIM tan solo permite asignar una única serie de valores para cada una de las variables consideradas, éste se ha calibrado para cada una de las cuatro celdas por separado, y sobre una quinta celda virtual, en la que las series de variables corresponden a las media de las cuatro celdas, para cada intervalo temporal.

5.1.1.2. *Influencia de las variables sinópticas sobre las series instrumentales*

La calibración de las 124 variables definidas en el ERA-Interim mediante GLIMCLIM, ha revelado que tan solo 25 de ellas son significativas para alguno de los estadios de alguna de las 5 celdas consideradas. Se ha seleccionado como celda de referencia la que contiene mayor número de variables significativas en los dos estadios (de las 25 seleccionadas), respecto a cada una de las series instrumentales (precipitación y temperatura, Tabla 5.1).

Variables de Reanálisis	Celda 1				Celda 2				Celda 3				Celda 4				Celda 5			
	Prec.		Temp.		Prec.		Temp.		Prec.		Temp.		Prec.		Temp.		Prec.		Temp.	
	G	L	G	L	G	L	G	L	G	L	G	L	G	L	G	L	G	L	G	L
Velocidad del viento componente O	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Velocidad del viento componente S	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Temperatura a 2 m	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Energía geopotencial	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Precipitación convectiva	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Evaporación	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Albedo previsto	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Rugosidad prevista en superficie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cobertura de nubes altas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Flujo de humedad instantáneo	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Flujo de calor instantáneo en superficie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Precipitación a gran escala	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cobertura de nubes bajas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Presión media a nivel del mar	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cobertura de nubes medias	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Escorrentía	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Temperatura en la superficie del mar	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Temperatura del suelo, nivel 1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Flujo de calor latente en superficie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Presión en superficie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Flujo de calor sensible en superficie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Radiación térmica en superficie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Radiación térmica máxima	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cobertura total de nubes	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Precipitación total	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla 5.1: Determinación de las variables de reanálisis del ECMWF que influyen sobre las series instrumentales de precipitación (Prec.) y temperatura (Temp) según la calibración del programa GLIMCLIM considerando los dos estadios de aproximación, regresión logística (L) y distribución gamma (G), en las cinco celdas de datos consideradas. Las casillas sombreadas más oscuras indican que la serie no es significativa para el estadio. Las celdas sombreadas claras indican que pese a que la serie es significativa para uno de los estadios, no lo es para los dos. Se ha considerado una única columna de temperatura puesto que las variables que influyen en la temperatura máxima y la temperatura mínima coinciden.

El resultado de la calibración, tal y como se observa en la Tabla 5.1, indica que la celda más representativa del comportamiento de las variables meteorológicas de la cuenca es la celda virtual compuesta por la media de cada valor puntual de las cuatro celdas que se encuentran ubicadas sobre la cuenca de estudio (celda 5). Las variables que son significativas para uno de los estadios pero no para el otro, no son utilizadas ya que los estadios por separado no tienen sentido físico. Igualmente se constata que existe una relación mucho más evidente de las variables climáticas con la temperatura que con la precipitación, debido a que la distribución logística que determina la ocurrencia o no del fenómeno, siempre es positiva en la temperatura.

Respecto a la precipitación, la gran variedad en la significatividad de las variables entre las distintas celdas indica falta de linealidad entre las variables y los datos (Palutikof et al., 2002; Fowler et al., 2007), lo que dificulta la determinación con una buena fiabilidad de la precipitación, partiendo de variables sinópticas y de circulación atmosférica.

Las variables sinópticas y de circulación climática para la determinación de la meteorología local más frecuentemente utilizadas son (Segui et al., 2010):

- Precipitación: La presión atmosférica (Stehlik y Bardossy, 2002), la altura geopotencial (Palutikof et al., 2002; Xoplaki et al., 2004), la velocidad del viento (Nuissier et al., 2011), la humedad (Hertig y Jacobeit, 2008a), la temperatura a distintos niveles atmosféricos (Frias et al., 2010), la vorticidad (Goodess y Palutikof, 1998; Goodess y Jones, 2002; Maraun et al., 2011), los patrones de precipitación a gran escala (Kioutsioukis et al., 2008; Beaulant et al., 2011), la condensación (Ibarra-Berastegi et al., 2011) la evapotranspiración y la radiación global (Stoll et al., 2011).
- Temperatura: La presión atmosférica (Stehlik y Bardossy, 2002), la altura geopotencial (Palutikof et al., 2002; Hertig y Jacobeit, 2008b), la velocidad del viento, la temperatura a distintos niveles atmosféricos y la humedad (Frias et al., 2010; Hertig et al., 2010)

Comparando estas variables con los resultados de la Tabla 5.1, se observa que mientras que mientras todas son significativas respecto a la serie instrumental de temperatura, esta relación no se cumple en la precipitación.

La simulación de datos sintéticos de precipitación y temperatura permiten la determinación de la dependencia de las series instrumentales frente a las variables climáticas (en este caso mediante Modelos Lineales Generalizados -GLMs-). El hecho de que estas series meteorológicas sintéticas sean dependientes de las variables climáticas implica que serán susceptibles a cualquier variación de los modelos de circulación general de la atmósfera (CGMs).

5.1.2. Series meteorológicas sintéticas

En el presente subapartado se presentan los resultados del *downscaling* climático de la precipitación y la temperatura en función de las relaciones determinadas en el subapartado anterior.

En climatología, la reducción de escala o *downscaling* se define como el conjunto de técnicas que permiten determinar la influencia de estructuras y procesos sinópticos globales y continentales, sobre las variaciones climáticas y meteorológicas de carácter local (Hewitson y Crane, 1996). El modelo GLIMCLIM se ajusta a tal definición, puesto que consiste en un modelo de simulación meteorológica (*weather generator* a escala diaria) respecto a un conjunto de estaciones de medida en base a series de variables sinópticas de circulación atmosférica y la distribución espacial y temporal de los fenómenos meteorológicos observados en las propias estaciones.

La reducción de escala de la precipitación y la temperatura se ha realizado por separado, ya que cada una de las series depende de variables atmosféricas distintas. Para cada una de las dos variables, se han simulado un total de 5 series sintéticas con el objetivo de comprobar la coherencia entre ellas, y contrastar la estabilidad del modelo de *downscaling*.

5.1.2.1. Serie de Precipitación

La correlación lineal entre variables indica la fuerza y la dirección de la relación lineal y proporcionalidad entre dos variables estadísticas. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra. Esta herramienta estadística es ampliamente utilizada para la determinación de la influencia entre variables de distintos orígenes.

Debido a la falta de linealidad entre las variables climáticas y la precipitación, se han comparado los resultados del *downscaling* con las series instrumentales disponibles en cada una de las estaciones de medida. Igualmente, se ha comparado la media de las series de precipitación de las estaciones y la media de las precipitaciones sintéticas determinadas mediante *downscaling*. La comparación entre dichas series se ha realizado para todas las estaciones de las que se dispone de datos continuos.

En el capítulo anterior, se han definido los índices de fiabilidad NS (Nash y Sutcliffe, 1970) y Pbias (Moriassi et al., 2007), y que son extensamente utilizados para la evaluación (validación y calibración) de modelos hidrológicos. Aunque con menos frecuencia, estos índices también se aplican a distintos modelos de simulación de precipitación (Tabary et al., 2007; Delrieu et al., 2009). En nuestro caso, se ha considerado que estos índices son apropiados para comprobar la

fiabilidad de las series sintéticas de precipitación frente a los datos instrumentales. Con el fin de comprobar la dependencia lineal entre series, se ha añadido al análisis el coeficiente de correlación de Pearson entre las series meteorológicas observadas (medidas) y las simuladas (Tabla 5.2).

	NS s1	NS s2	NS s3	NS s4	NS s5	Pbias s1	Pbias s2	Pbias s3	Pbias s4	Pbias s5	r s1	r s2	r s3	r s4	r s5
Total	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	52.87	52.87	52.87	52.87	52.87	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74
g1															
g2	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	51.08	51.10	51.07	51.11	51.07	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
g3	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	29.62	29.62	29.62	29.62	29.62	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
g4	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	28.45	28.45	28.40	28.43	28.25	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
g5	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	21.04	21.08	21.05	21.08	21.09	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
g6	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	45.21	45.21	45.21	45.21	45.21	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
g7															
g8	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	82.78	82.78	82.78	82.76	82.78	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
g9	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	58.18	58.18	58.18	58.18	58.18	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
g10	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	15.86	15.86	15.86	15.86	15.86	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
g11	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	84.82	84.73	84.82	84.52	84.82	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
g12	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	67.05	67.02	67.07	67.03	67.07	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
g13															

Tabla 5.2: índice de Nash-Sutcliffe (NS), desviación Pbias (Pbias) y Correlación bivariada de Pearson (Pe, significativa en todos los casos en 0.01) entre las series instrumentales y las sintéticas, resultantes de cinco simulaciones distintas (s), para cada una de las estaciones meteorológicas (g) de la cuenca de Valdeinfierno, y para la precipitación media total. Las estaciones meteorológicas consideradas son: (g1) Maríal, (g2) Topares, (g3) Caravaca, (g4) Vélez-Blanco, (g5) Tirieza Alta (Lorca), (g6) Fontanares (Lorca), (g7) Valencianos (Vélez-Blanco), (g8) María2, (g9) Los Royos (Caravaca), (g10) Los Royos auto., (g11) Casa Alta (Caravaca), (g12) Valdeinfierno, (g13) Casa Iglesia. Las celdas sombreadas indican que la estación de medida no tiene datos suficientes para poder ser comparada con la serie sintética (>10% de medidas del periodo total considerado).

	NS s1	NS s2	NS s3	NS s4	NS s5	Pbias s1	Pbias s2	Pbias s3	Pbias s4	Pbias s5	r s1	r s2	r s3	r s4	r s5
Total	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	6.48	6.48	6.48	6.48	6.48	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63
g1															
g2	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
g3	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
g4	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	5.22	5.22	5.22	5.22	5.22	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
g5	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
g6	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	5.36	5.36	5.36	5.36	5.36	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
g7															
g8	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	14.63	14.63	14.63	14.63	14.63	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
g9	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	7.08	7.08	7.08	7.08	7.08	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
g10	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
g11	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
g12	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	12.16	12.16	12.16	12.16	12.16	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
g13															

Tabla 5.3: índice de Nash-Sutcliffe (NS), desviación Pbias (Pbias) y Correlación bivariada de Pearson (Pe, significativa en todos los casos en 0.01) entre las series instrumentales y sintéticas, resultantes de cinco simulaciones distintas (s), para cada una de las estaciones meteorológicas (g) de la cuenca de Valdeinfierno, y para la precipitación media total, considerando la precipitación >0. Las estaciones meteorológicas consideradas son: (g1) Maríal, (g2) Topares, (g3) Caravaca, (g4) Vélez-Blanco, (g5) Tirieza Alta (Lorca), (g6) Fontanares (Lorca), (g7) Valencianos (Vélez-Blanco), (g8) María2, (g9) Los Royos (Caravaca), (g10) Los Royos auto., (g11) Casa Alta (Caravaca), (g12) Valdeinfierno, (g13) Casa Iglesia. Las celdas sombreadas indican que la estación de medida no tiene datos suficientes para poder ser comparada con la serie sintética (>10% de medidas del periodo total considerado).

En la Tabla 5.2 se observa que la correlación de Pearson entre series es significativa para todas las estaciones, con coeficientes de correlación elevados en el total en la cuenca y en la mayoría de las estaciones (20% estaciones por debajo de 0.5). Por su parte, los índices NS y Pbias indican una simulación deficiente en la mayoría de estaciones (en 80% estaciones NS < 0.7 y en 90% estaciones Pbias > 25), según los rangos expuestos en el capítulo 4 y en Moriasi et al.,

(2007). Pese a este mal resultado, es interesante resaltar que independientemente de la simulación considerada, tanto la correlación de Pearson como los índices NS y Pbias tienen el mismo valor.

Analizando las series de precipitación observada y simulada en cada una de las estaciones, se observa que en el 87.8% de los días de la serie instrumental no se produce precipitación, mientras que en el caso de las series sintéticas, el 87.3% de los días se produce una precipitación inferior a 1 mm. Puesto que, como se ha observado y discutido en el apartado anterior, los días en los que no se produce precipitación no tienen un efecto significativo sobre estos fenómenos (influencia de los picos), se ha repetido el análisis considerando tan solo los días en los que se produce precipitación a lo largo de la serie instrumental (Tabla 5.3).

Restringiendo el análisis de correlación a los días con precipitación, los índices NS y Pbias presentan buenos resultados ($NS > 0.7$ y $Pbias < 15$ en todas las estaciones). Por el contrario, la correlación de Pearson se reduce (entre 0.03 y 0.15) aunque sigue siendo aceptable (40% estaciones por debajo de 0.5), y en todas ellas es significativa. Comparando los resultados de los índices de fiabilidad con y sin el filtrado de los días en función de la ocurrencia de la precipitación, se pone de manifiesto la importancia de los rangos de valores considerados para las simulaciones de series meteorológicas.

Con el objetivo de profundizar en las implicaciones de la restricción del límite inferior de la precipitación mínima considerada en la comparación entre series, se ha elaborado una figura en la que se compara las series de precipitación total acumulada instrumental y de medidas diarias de las precipitaciones sintéticas con distintos umbrales mínimos de precipitación, a lo largo de todo el periodo del que se dispone de datos de reanálisis para la simulación (Figura 5.1). En la Figura 5.1 se observa que los valores de la precipitación acumulada (sin filtros) en la serie simulada son muy superiores a los registrados en la serie observada. Según se aplican filtros en los que se descartan días con precipitación mínima, la diferencia entre ambas series se reduce significativamente, llegando a la inversión de las curvas (precipitación acumulada observada mayor que la simulada) para filtros mayores a 5 mm/día.

Respecto a las pérdidas acumuladas en volumen total considerando los distintos filtros para las dos series de precipitación (instrumental y simulada), la pérdida de precipitación acumulada derivada de filtrar precipitación menor a 1 mm es de un 3.7% en la serie instrumental y de un 7.4% en la serie simulada. Si se considera el filtro de 5 mm la pérdida de precipitación es de un 23, y de un 49 % respectivamente. Para el filtro de 7.5, se invierte la tendencia de la relación entre las curvas, y la precipitación observada pasa a ser mayor que la simulada. En este caso, la pérdida de la curva observada es del 41% y del 66% en la simulada. Por último, en el caso del filtro máximo aplicado (10 mm), las pérdidas corresponden al 44% y al 78% de la precipitación observada y simulada respectivamente.

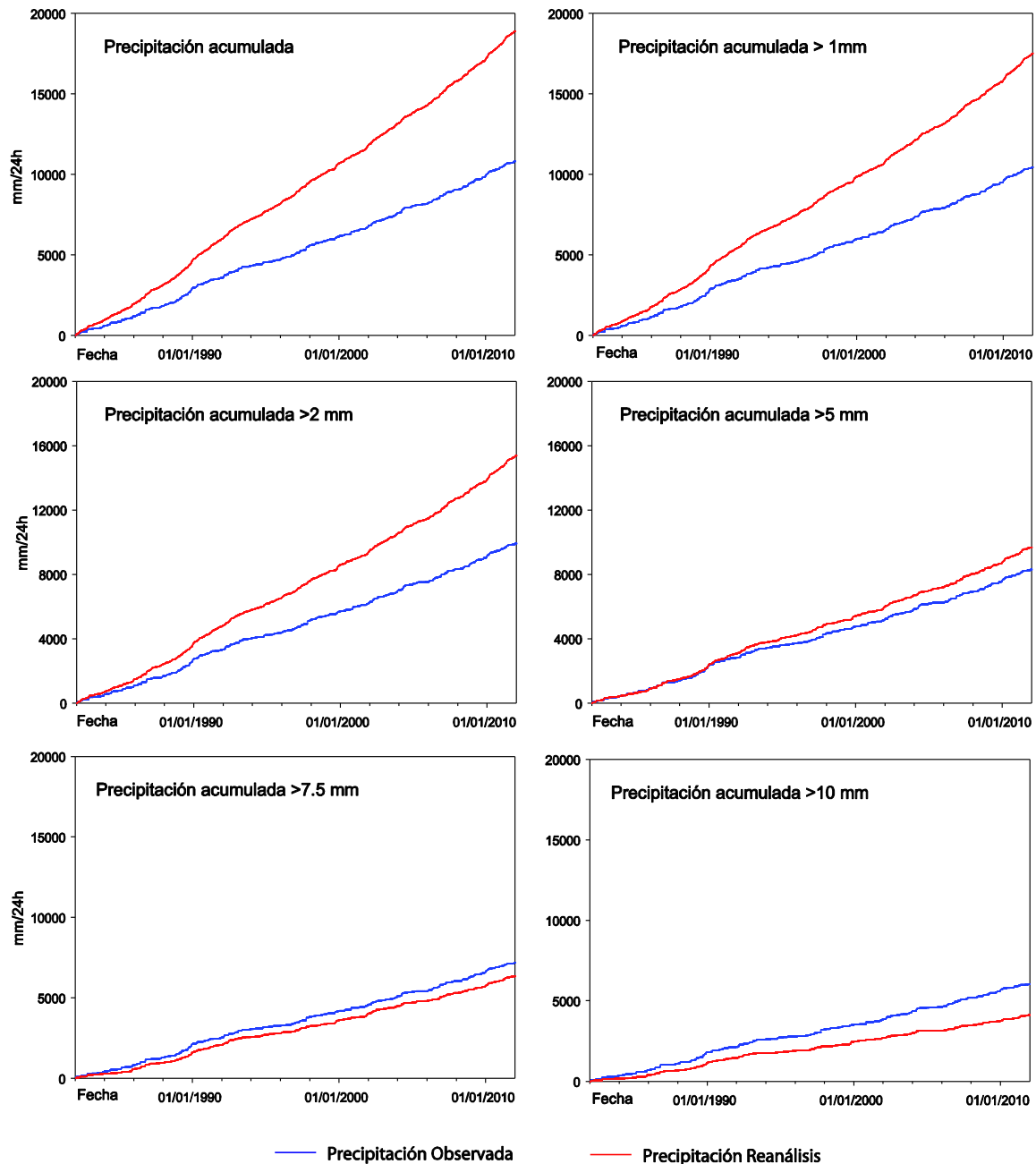


Figura 5.1: Comparación entre la precipitación acumulada observada y simulada mediante *downscaling* de los datos atmosféricos del ECMWF. Se han elaborado distintos gráficos considerando diversos umbrales mínimos de precipitación (filtros).

Comparando los valores de la precipitación acumulada observada vs simulada (Figura 5.1, Tabla 5.2 y Tabla 5.3) se puede concluir que el modelo de reducción de escala tiende a sobrevalorar precipitaciones mínimas respecto a los datos observados y a minimizar las precipitaciones máximas. No obstante, puesto que los índices de fiabilidad para precipitaciones mayores a 1 mm son buenos, la desviación de los picos mayores simulados respecto a los observados no es muy significativa ($P_{bias} < 15$), por lo que la separación entre las curvas de precipitación observada y simulada, se debe principalmente a la acumulación en el tiempo de pequeños errores más o menos sistemáticos producidos por el modelo GLIMCLIM.

5.1.2.2. *Serie de Temperatura*

Se han comparado los resultados del *downscaling* con las series instrumentales de temperatura máxima y mínima de las estaciones y con la temperatura media en toda la cuenca. Al contrario que para la precipitación la temperatura presenta una alta linealidad entre las variables atmosféricas y las series de temperatura registradas en las estaciones.

Mes	Temperatura máxima media °C			Temperatura mínima media °C		
	Observada	Simulada	Diferencia	Observada	Simulada	Diferencia
Enero	10.66	10.48	-0.18	0.05	-0.09	-0.14
Febrero	12.00	11.91	-0.09	0.88	0.77	-0.11
Marzo	14.98	14.86	-0.12	2.73	2.70	-0.03
Abril	17.01	17.02	0.00	4.40	4.47	0.07
Mayo	21.31	21.28	-0.02	7.64	7.71	0.07
Junio	27.24	27.19	-0.06	11.93	11.95	0.02
Julio	31.54	31.51	-0.02	15.13	15.20	0.07
Agosto	31.12	31.09	-0.03	15.08	15.17	0.09
Septiembre	25.79	25.79	0.00	11.72	11.76	0.04
Octubre	19.97	19.98	0.01	7.86	7.85	-0.01
Noviembre	14.42	14.33	-0.09	3.56	3.58	0.02
Diciembre	11.15	11.14	-0.02	0.91	0.92	0.01

Tabla 5.4: Comparación entre la media de las temperaturas mensuales máxima y mínima observadas y simuladas mediante *downscaling* de los datos atmosféricos del ECMWF.

En el caso de la temperatura, las variables de fiabilidad NS y Pbias no son aplicables. Por este motivo, para la comparación entre las observaciones y las series sintéticas, se ha utilizado la comparación entre las medias mensuales para todo el periodo de la temperatura máxima y mínima, observada y simulada (Tabla 5.4), y la correlación de Pearson para toda la serie (Tabla 5.5).

En la Tabla 5.4, se observa que los errores absolutos máximos localizados entre la media mensual de la series de datos observados y la de datos simulados es inferior a 0.15°C para las dos variables (Temperatura máxima y mínima) en cualquiera de los meses. Los resultados de la correlación bivariada de Pearson (Tabla 5.5) reflejan que la significancia entre las series T observada y simulada es muy elevada, incluso entre las series de temperatura máxima y mínima.

		Tmax simulada	Tmin simulada
Tmax observada	Correlación de Pearson	1.000	0.619
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000
Tmin observada	Correlación de Pearson	0.620	0.999
	Sig. (bilateral)	0.000	0.000

Tabla 5.5: Correlación bivariada de Pearson entre serie de temperaturas diarias máxima y mínima observadas y simuladas mediante *downscaling* de los datos atmosféricos del ECMWF.

Observando en detalle la Tabla 5.4, se constata que a pesar de la buena correlación entre las series, la simulación subestima las temperaturas máximas (75% de diferencias negativas) y sobreestima las temperaturas mínimas (66.6% de diferencias positivas). Esta tendencia del modelo de *downscaling* a disminuir los rangos de variabilidad de la variable simulada ya se ha puesto de manifiesto con la precipitación, con una sobrevaloración de los mínimos y e infravaloración de los máximos. A pesar de la suavización de los valores, la buena correlación

entre las series instrumentales y sintéticas indica que los errores siempre son localizados y de pequeña magnitud y que, por lo tanto, a nivel de evento son prácticamente despreciables.

5.1.2.3. Dependencia lineal entre las variables de reanálisis y las series instrumentales en la simulación hidrológica

El modelo GLIMCLIM calcula las series de precipitación y temperatura sintéticas según el estadio de ocurrencia y el estadio de magnitud de las variables sinópticas de circulación climática, frente a la serie de datos instrumental. La metodología de cálculo de las series de precipitación y temperatura no implica una dependencia lineal de las mismas, ya que ni el cálculo del modelo de ocurrencia (estadio 1, regresión logística) ni el cálculo del modelo de magnitud (estadio 2, distribución gamma) son lineales (Chandler y Wheeler, 2002).

Esta falta de linealidad ha llevado a plantear cual es el grado de dependencia lineal entre las series instrumentales y las variables sinópticas de reanálisis, y en último término, cual es el grado de dependencia lineal de las variables del reanálisis con la hidrología y la sedimentología de la cuenca. Con este objetivo, se ha determinado la correlación bilateral de Pearson de las series de variables del reanálisis con la precipitación y las temperaturas mínima y máxima de la cuenca (Tabla 5.6).

En los resultados expuestos en la Tabla 5.6 resultan llamativas las diferencias en las correlaciones de precipitación observada y precipitación simulada. Particularmente destaca el hecho de que las variables de reanálisis siempre son más significativas respecto a la serie de observación que frente a la serie sintética simulada (calculada a partir de dichas variables). Sin embargo, en las series de temperaturas no se observa esta particularidad.

En la comparación entre la Tabla 5.1 y la Tabla 5.6, se observa que en la primera se han determinado un total de 11 variables que influyen sobre la precipitación y 21 sobre la temperatura (para la celda 5, utilizada en el *downscaling*), mientras que en la segunda se han determinado un total de 7 variables que presentan dependencia con la precipitación observada, 6 con la precipitación simulada, 14 con las temperaturas máximas y 13 con las temperaturas mínimas (en ambos casos para la observada y simulada por igual). Además, de las variables dependientes, en el caso de la precipitación observada, tan solo 5 coinciden con las variables de influencia, 2 en el caso de la precipitación simulada y 10 en el caso de las temperaturas (las mismas para temperatura máxima, mínima, observada y simulada). De estos resultados, se pueden extraer tres ideas principales. (1) Una correlación lineal entre variables de reanálisis y series instrumentales no implica necesariamente que las variables influyan en el fenómeno. (2) La correlación lineal entre una serie meteorológica sintética y las variables de reanálisis de las que depende no es mayor a la que existe con la serie instrumental. (3) De acuerdo a lo expuesto

por Fowler et al. (2007) y Palutikof et al. (2002), una elevada variabilidad en la significatividad entre las variables y los datos indica falta de linealidad.

		Prec. obs.	Prec. sim.	Tº max obs.	Tº max. sim.	Tº min. obs.	Tº min. sim.
Vel. viento O	Correlación de Pearson	0.518	0.552	-0.802**	-0.802**	-0.824**	-0.824**
	Sig. (bilateral)	0.084	0.063	0.002	0.002	0.001	0.001
Vel. viento S	Correlación de Pearson	0.269	0.230	-0.333	-0.335	-0.355	-0.357
	Sig. (bilateral)	0.398	0.472	0.289	0.288	0.258	0.255
Tº a 2 m	Correlación de Pearson	-0.711**	-0.630*	0.976**	0.976**	0.984**	0.983**
	Sig. (bilateral)	0.009	0.028	0.000	0.000	0.000	0.000
E. geopotencial	Correlación de Pearson	-0.518	-0.452	0.801**	0.801**	0.816**	0.814**
	Sig. (bilateral)	0.085	0.141	0.002	0.002	0.001	0.001
Prec. conv.	Correlación de Pearson	0.575	0.563	-0.503	-0.502	-0.476	-0.481
	Sig. (bilateral)	0.051	0.057	0.095	0.096	0.118	0.113
Evaporación	Correlación de Pearson	-0.439	-0.599*	0.256	0.254	0.222	0.223
	Sig. (bilateral)	0.154	0.040	0.422	0.425	0.489	0.486
Alveldo previsto	Correlación de Pearson	0.229	0.137	-0.498	-0.498	-0.446	-0.449
	Sig. (bilateral)	0.474	0.672	0.100	0.099	0.146	0.143
Rug. sup. prevista	Correlación de Pearson	-0.613*	-0.541	0.755**	0.756**	0.755**	0.760**
	Sig. (bilateral)	0.034	0.070	0.005	0.004	0.005	0.004
Cov. nubes altas	Correlación de Pearson	0.453	0.330	-0.668*	-0.668*	-0.669*	-0.672*
	Sig. (bilateral)	0.139	0.295	0.018	0.018	0.017	0.017
Flujo hum. inst.	Correlación de Pearson	-0.611*	-0.686*	0.516	0.515	0.470	0.471
	Sig. (bilateral)	0.035	0.014	0.086	0.087	0.123	0.122
Flujo calor instant. en sup.	Correlación de Pearson	-0.648*	-0.608*	0.665*	0.664*	0.612*	0.611*
	Sig. (bilateral)	0.023	0.036	0.018	0.019	0.035	0.035
Prec. gran escala	Correlación de Pearson	0.479	0.404	-0.674*	-0.674*	-0.653*	-0.657*
	Sig. (bilateral)	0.115	0.193	0.016	0.016	0.021	0.020
Cov. nubes bajas	Correlación de Pearson	0.536	0.415	-0.811**	-0.811**	-0.779**	-0.782**
	Sig. (bilateral)	0.072	0.180	0.001	0.001	0.003	0.003
Presión 1/2 nivel mar	Correlación de Pearson	-0.672*	-0.626*	0.487	0.486	0.472	0.471
	Sig. (bilateral)	0.017	0.030	0.109	0.109	0.122	0.122
Cov. nubes medias	Correlación de Pearson	0.585*	0.510	-0.881**	-0.882**	-0.888**	-0.891**
	Sig. (bilateral)	0.046	0.090	0.000	0.000	0.000	0.000
Escorrentía	Correlación de Pearson	0.159	0.256	-0.146	-0.146	-0.210	-0.207
	Sig. (bilateral)	0.621	0.422	0.650	0.651	0.512	0.519
Tº sup. mar	Correlación de Pearson	-0.618*	-0.538	0.909**	0.909**	0.936**	0.935**
	Sig. (bilateral)	0.032	0.071	0.000	0.000	0.000	0.000
Tº suelo nivel 1	Correlación de Pearson	-0.672*	-0.589*	0.957**	0.957**	0.973**	0.972**
	Sig. (bilateral)	0.017	0.044	0.000	0.000	0.000	0.000
Flujo calor latente en sup.	Correlación de Pearson	0.460	0.484	-0.300	-0.299	-0.264	-0.266
	Sig. (bilateral)	0.132	0.111	0.343	0.345	0.406	0.404
Presión en sup.	Correlación de Pearson	0.057	-0.050	-0.136	-0.134	-0.121	-0.116
	Sig. (bilateral)	0.861	0.878	0.674	0.678	0.708	0.720
Flujo calor sensible en sup.	Correlación de Pearson	-0.539	-0.499	0.194	0.192	0.166	0.163
	Sig. (bilateral)	0.071	0.099	0.546	0.551	0.607	0.612
Rad. térmica en sup.	Correlación de Pearson	-0.092	-0.054	0.202	0.203	0.167	0.168
	Sig. (bilateral)	0.777	0.867	0.528	0.527	0.604	0.601
Radiación térmica max	Correlación de Pearson	0.734**	0.636*	-0.936**	-0.936**	-0.933**	-0.935**
	Sig. (bilateral)	0.007	0.026	0.000	0.000	0.000	0.000
Cov. nubes total	Correlación de Pearson	0.527	0.402	-0.770**	-0.770**	-0.762**	-0.765**
	Sig. (bilateral)	0.078	0.195	0.003	0.003	0.004	0.004
Prec. total	Correlación de Pearson	0.542	0.501	-0.591*	-0.591*	-0.566	-0.571
	Sig. (bilateral)	0.069	0.097	0.043	0.043	0.055	0.052

(**). La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral)

(*). La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral)

Tabla 5.6: Correlación de Pearson entre las series meteorológicas de precipitación y temperatura observadas y simuladas mediante *downscaling*, y los valores de circulación de Reanálisis del proyecto ERA-Interim del ECMWF. El sombreado indica que la correlación no es significativa.

5.1.2.4. Efectos del *downscaling* sobre la hidrología y la sedimentología

Las series de precipitación y temperatura constituyen dos elementos meteorológicos básicos para la simulación hidrológica y sedimentológica mediante el modelo hidrológico y sedimentológico TETIS-SED. La influencia sobre la hidrología y en la producción de los sedimentos de la

utilización de variables meteorológicas sintéticas en el modelo TETIS-SED se ha analizado comparado los resultados de caudal de agua y de sedimentos obtenidos considerando los datos meteorológicos instrumentales, y los obtenidos mediante las series sintéticas generadas por el modelo de reducción de escala (*downscaling*). Para la comparación se ha utilizado el periodo entre Enero de 1979 y Mayo de 2012 del que se disponen de datos de ambas series (Figura 5.2).

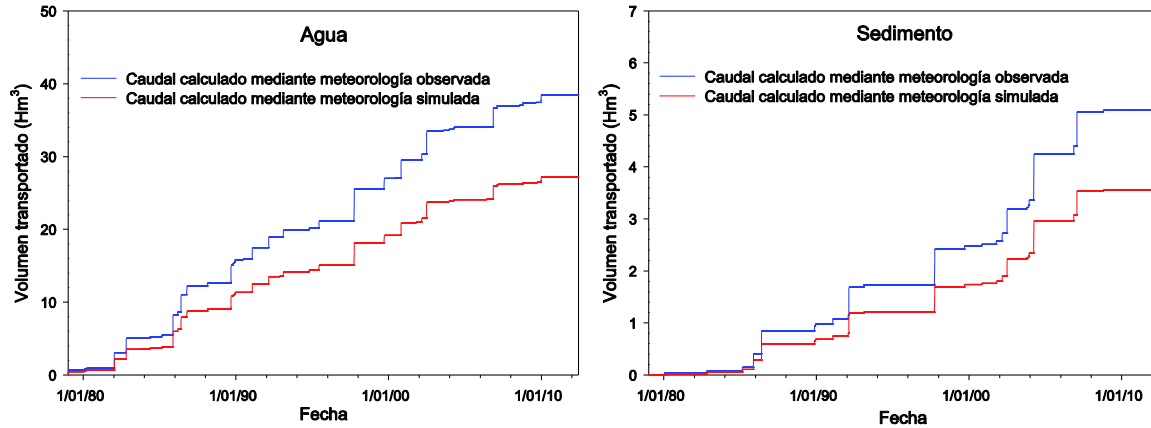


Figura 5.2: Caudal acumulado de agua y de sedimento calculados mediante el modelo TETIS-SED, considerando los datos meteorológicos de observación (en azul) y los datos meteorológicos sintéticos calculados mediante el modelo GLIMCLIM a partir de las variables sinópticas de reanálisis del ECMWF, para el periodo del que se dispone de datos de reanálisis (1979-2012).

En la Figura 5.2 se observa que tanto en el caudal líquido como en el caudal de sedimento el volumen final transportado es mayor en las series meteorológicas observadas que en las simuladas (o sintéticas). En ambos casos, se identifican diferencias en la magnitud de los picos (altura de los escalones en la figura) y la presencia / ausencia de algunos eventos menores (número de escalones). Las diferencias entre las curvas de volumen acumulado son de 29.3% para el caudal líquido, y de 30% para el caudal de sedimento. La similitud entre estas diferencias y la diferencia entre la precipitación > 10mm observada y simulada en la Figura 5.1 (32% de diferencia), confirma que la tendencia del error en los caudales simulados es muy parecida a la que se ha identificado en la serie de precipitación, y que se debe a la acumulación errores en los eventos. Con el objetivo de determinar la veracidad de esta hipótesis en los caudales, se han calculado los índices de fiabilidad de NS (Nash y Sutcliffe, 1970) y Pbias (Moriasi et al., 2007), así como el coeficiente de correlación lineal bivariada de Pearson (Tabla 5.7) sobre las series de caudales.

	NS	Pbias	r
Caudal de agua	0.914	23.530	0.897
Caudal de sedimento	0.910	19.333	0.915

Tabla 5.7: índice de Nash-Sutcliffe (NS), desviación Pbias y Correlación bivariada de Pearson (significativa en todos los casos en 0.01) entre los caudales de agua y sedimento calculados mediante las series meteorológicas instrumentales y sintéticas.

En la Tabla 5.7 se observa que el índice NS presenta un resultado muy bueno, y que el índice Pbias presenta un resultado aceptable ($NS > 0.9$ y $Pbias < 25$ en todas las estaciones) de acuerdo a los rangos de bondad indicados en Moriasi et al., (2007). Además se constata que su correlación lineal es muy buena, ya que es significativa a nivel 0.01, con unos índices de correlación de Pearson alrededor de 0.9.

La simulación de la meteorología utilizando datos sinópticos de reanálisis ha permitido la determinación de unas series de precipitación y unas temperaturas sintéticas que son representativas de las series instrumentales, aunque presentan pequeñas divergencias acumulativas en el tiempo respecto a los datos de observación, poco influyentes a nivel de evento. Por otro lado, se ha observado que la linealidad entre las series meteorológicas y las series de variables de reanálisis no es indicativa de la dependencia entre ambas series. La buena correlación entre las series meteorológicas observadas y las series meteorológicas sintéticas indica que las series sintéticas son representativas de las tendencias de la meteorología real (teniendo en cuenta la desviación entre las series observadas y sintéticas), y pueden ser utilizadas en la estimación del comportamiento hidrológico y sedimentológico de la cuenca de estudio. Como consecuencia de la determinación de las variables de precipitación y temperatura dependientes de las características de la cuenca y de la climatología (en este caso las series sintéticas), es posible plantear escenarios de modificación del clima con la garantía de que las variables meteorológicas sobre las que se aplican son representativas de las tendencias de los fenómenos naturales y dependientes del clima (Hewitson y Crane, 1996). Por extensión, en base a estas variables sintéticas se puede aplicar distintos escenarios futuros y pasados de cambio y variabilidad climática.

5.2. Escenarios climáticos y evolución hidrológica y sedimentológica de la cuenca de Valdeinfierno

Las variables sinópticas de reanálisis a lo largo del periodo instrumental han permitido calcular una precipitación y una temperatura sintéticas comparables y coherentes con los datos de las estaciones meteorológicas. No obstante, estas series sintéticas han sido calculadas en base a los datos observados y a las variables sinópticas de un periodo concreto, utilizando un modelo (GLIMCLIM) que no permite su proyección hacia el futuro. Para proyectar estas variables a lo largo de los próximos años y décadas, se hace necesario utilizar distintos escenarios de evolución climática, determinar los cambios de las variables climáticas y atmosféricas sobre dichos escenarios (anomalías), y calcular estas modificaciones respecto a las series sintéticas.

Los escenarios de evolución climática deben de considerar el efecto de las distintas actividades humanas, puesto que suponen el principal motor del cambio climático (IPCC, 1990). A escala global, la emisión de gases de efecto invernadero subproducto de la actividad humana constituye el principal forzamiento del calentamiento del clima, con importantes impactos en la

circulación atmosférica y la hidrología. A escala de cuenca, además del clima se debe de valorar los efectos del cambio de uso del suelo y la cobertura vegetal sobre la hidrología y la erosión. En el presente apartado se determina el impacto de los diferentes escenarios de cambio climático en la hidrología y el producción de sedimentos en la cuenca de estudio mientras que en el siguiente (apartado 5.3) se contempla la influencia de diversas configuraciones de usos y gestión del suelo en la hidrología y la erosión.

5.2.1. Escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático utilizados para el presente estudio forman parte de los desarrollados en el Informe especial de escenarios de emisión (SRES, Nakicenovic et al.,(2000), que corresponden a los utilizados en el Cuarto Informe del IPCC, conocido como AR4 (Bernstein et al., 2007). Estos escenarios han sido contruidos para determinar los impactos, vulnerabilidad y adaptación de cambio climático en relación a las tasas de emisión de gases de efecto invernadero y aerosoles durante el Siglo XXI.

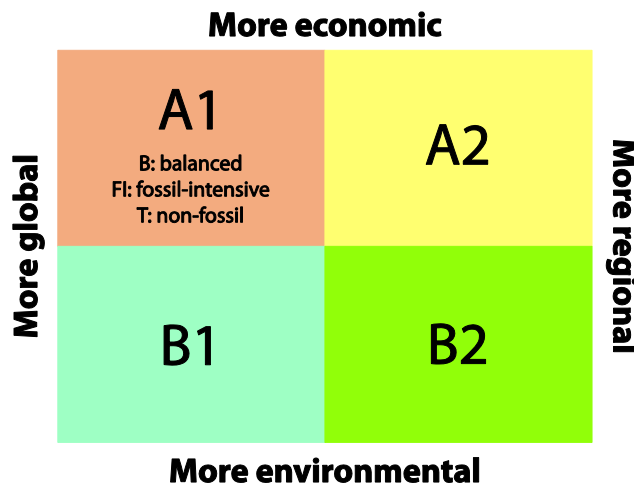


Figura 5.3: Representación esquemática de las familias de escenarios SRES. Las familias A1 y A2 se centran más en factores económicos que las familias B1 y B2, que se centran más en factores medioambientales. Las familias A1 y B1 se basan en un mundo con una economía y desarrollo de carácter global (mayor eficiencia energética, disminución de la población desde mitad del S.XXI), mientras que en las líneas evolutivas de las familias A2 y B2 consideran que la economía presentará un carácter regional (mayor autosuficiencia, tecnología fragmentada). Figura modificada de (Canadian_climate_Impacts_scenarios, 2003)

Los escenarios de emisiones contemplan cuatro líneas evolutivas cualitativas que proporcionan cuatro conjuntos de escenarios denominados familias (Nakicenovic et al., 2000): A1, A2, B1 y B2, con un total de 40 escenarios. Estos escenarios son igualmente válidos, y no tienen asignadas probabilidades de hacerse realidad. El conjunto de escenarios se compone de seis grupos tomados de las cuatro familias: un grupo de cada una de las familias A2, B1 y B2, y tres grupos de la familia A1, que caracterizan el desarrollo alternativo de tecnologías de energía:

A1FI (utilización intensiva de combustibles de origen fósil), A1B (equilibrado) y A1T (predominantemente con combustibles no de origen fósil) (Figura 5.3).

Tal y como se observa en la Figura 5.3 cada grupo contempla una línea de evolución global distinta:

- La línea evolutiva y familia de escenarios A1 describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes.

Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Los tres grupos A1 se diferencian en su orientación tecnológica: utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía no de origen fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes de suministro con evoluciones similares (A1B).

- La familia de líneas evolutivas y escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.
- La familia de líneas evolutivas y escenarios B1 describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales, y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.
- La familia de líneas evolutivas y escenarios B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado

a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

Dentro de cada familia y grupo de escenarios, algunos de ellos comparten supuestos “armonizados” sobre la población mundial, el producto interior bruto y la energía final (Nakicenovic et al., 2000). En el cuarto informe del IPCC se considera el escenario más ilustrativo de cada uno de los grupos (Figura 5.4).

Para la proyección de cambio climático en el siglo XXI, de los seis escenarios considerados

en el AR4, se han seleccionado tres SRES, B1 A1B y A2, que son considerados como los escenarios de baja, media y alta emisión de gases respectivamente (IPCC, 2007b). Esta consideración no implica una preferencia de estos tres escenarios sobre los restantes.

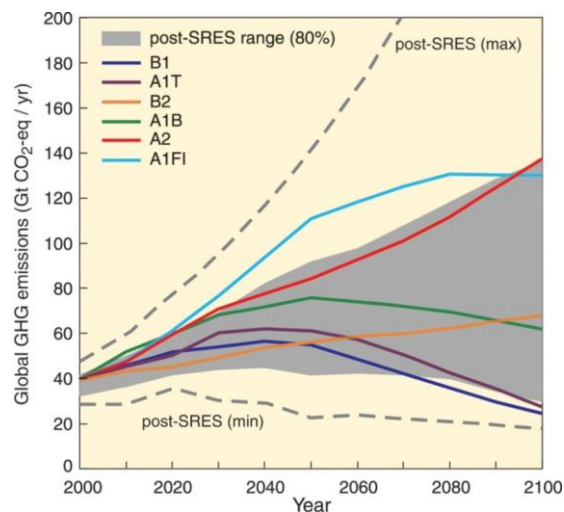


Figura 5.4: Previsión de las emisiones de gases de efecto invernadero presentados en el AR4, calculados en base a los grupos de escenarios seleccionados del SRES (líneas coloreadas) y el rango de percentil 80 de los escenarios posteriores al SRES (post-SRES, en sombreado gris). La línea de puntos indica el rango total de escenarios post-SRES (figura extraída de Bernstein et al., 2007).

5.2.2. Variables meteorológicas

La simulación hidrológica se basa en la transformación de la lluvia en escorrentía, y por tanto requiere de series de datos meteorológicas durante el periodo que se pretende simular. Los escenarios del IPCC suponen un gran avance para la sistematización de las emisiones de gases bajo supuestos de la evolución socioeconómica en el futuro, aunque no aportan información climática. No obstante, las emisiones de gases asociados a los escenarios SRES se utilizan como forzamiento en los modelos climáticos de circulación global (GCMs), generando series de variables climáticas cuyos resultados pueden variar según los modelos (Carter et al., 2007). El IPCC en su Cuarto Informe sobre el Cambio Climático ha aplicado para sus conclusiones un total de 23 GCMs (IPCC, 2007a) que definen la proyección de los cambios de las variables climáticas y de circulación de la atmósfera a nivel global durante el siglo XXI (Tabla 5.8). Es importante destacar que en el AR4 no se prioriza, ni se considera más correcto los resultados de un modelo frente a los de otro, ya que al tratarse de modelos de proyección y estar centrados en áreas geográficas muy distintas, se desconoce la precisión de los mismos en cada celda del planeta (Wilby et al., 2004; Carter et al., 2007; IPCC, 2007b).

En el presente estudio se ha analizado la influencia de todos los modelos de circulación incluidos en la base de datos CMIP3 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 3*) y

utilizados como referencia en el informe AR4 del IPCC. Las proyecciones de la precipitación y temperatura de cada uno de los modelos de la base de datos CMIP3 incluyen los escenarios y horizontes temporales (periodos de 30 años) que se exponen a continuación.

- Simulación del siglo XX (20CM3): 1961–1990
- Escenario B1: 2010-2039; 2040-2069; 2070-2099
- Escenario A1B: 2010-2039; 2040-2069; 2070-2099
- Escenario A2: 2010-2039; 2040-2069; 2070-2099

Modelo	Nombre completo del modelo	Organismo	Referencia
(1) BCCM1	BCC-CM1	Beijing Climate Center, National Climate Center, China Meteorological Administration	(CSMD, 2005)
(2) BCM2	Bergen Climate Model (BCM) Version 2	Bjerknes Centre for Climate Research (BCCR), Univ. of Bergen	(Furevik et al., 2003)
(3) CGHR	Coupled Global Climate Model (CGCM3) high resolution	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	(Flato y Boer, 2001; Kim et al., 2002; Kim et al., 2003)
(4) CGMR	Coupled Global Climate Model (CGCM3) medium resolution	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	(Flato y Boer, 2001; Kim et al., 2002; Kim et al., 2003)
(5) CNCM3	CNRM-CM3	Centre National de Recherches Meteorologiques, Météo France	(Deque et al., 1994; Gíbelin y Deque, 2003)
(6) CSMK3	CSIRO Mark 3.0	CSIRO	(Gordon et al., 2002; Cai et al., 2003)
(7) ECHO-G	ECHO-G = ECHAM4 + HOPE-G	Meteorological Institute of the University of Bonn, Institute of KMA, and Model and Data Group.	(Legutke et al., 1999)
(8) FGOALS	FGOALS1.0_g	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences	(Yu et al., 2002; Yu et al., 2004)
(9) GFCM20	CM2.0 - AOGCM	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA	(Delworth et al., 2006; Gnanadesikan et al., 2006; Stouffer et al., 2006; Wittenberg et al., 2006)
(10) GFCM21	CM2.1 - AOGCM	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA	(Delworth et al., 2006; Gnanadesikan et al., 2006; Stouffer et al., 2006; Wittenberg et al., 2006)
(11) GIAOM	GISS AOM 4x3	NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA/GISS)	(Russell et al., 1995)
(12) GIEH	GISS ModelE-H	Goddard Institute for Space Studies (GISS), NASA,	(Schmidt et al., 2006)
(13) GIER	GISS ModelE-R	Goddard Institute for Space Studies (GISS), NASA,	(Schmidt et al., 2006)
(14) HADCM3	HadCM3	Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office	(Pope et al., 2000; Johns et al., 2003)
(15) HADGEM	Global Environmental Model, version1 (HadGEM1)	Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office	(Johns et al., 2006; Martin et al., 2006; Ringer et al., 2006)
(16) INCM3	INMCM3.0	Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Science	(Diansky et al., 2002; Diansky y Volodin, 2002)
(17) IPCM4	IPSL-CM4	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)	(Hourdin et al., 2006)
(18) MIHR	MIROC3.2 (Model for Interdisciplinary Research on Climate) (hires)	CCSR/NIES/FRCGC	(K-1_model_developers, 2004)
(19) MIMR	MIROC3.2 (Model for Interdisciplinary Research on Climate) (medres)	CCSR/NIES/FRCGC	(K-1_model_developers, 2004)
(20) MPEH5	ECHAM5/MPI-OM	Max Planck Institute for Meteorology	(Roeckner et al., 2003; Jungclaus et al., 2006)
(21) MRGCM	MRI-CGCM2.3.2	Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency	(Yukimoto et al., 2001; Yukimoto y Noda, 2002; Yukimoto et al., 2006)
(22) NCCCSM	Community Climate System Model, version 3.0 (CCSM3)	National Center for Atmospheric Research (NCAR)	(Collins et al., 2006)
(23) NCPCM	Parallel Climate Model (PCM)	National Center for Atmospheric Research (NCAR), NSF (a primary sponsor), DOE (a primary sponsor), NASA, and NOAA	(Washington et al., 2000)

Tabla 5.8: Modelos de Circulación Global (GCM) utilizados por el IPCC para calcular las distintas previsiones de cambios de circulación a lo largo del siglo XXI, en base a los escenarios de cambio global (SRES) considerados en el AR4 (IPCC, 2007b).

El cálculo de la anomalía de la precipitación y la temperatura mensuales en la cuenca de estudio se ha estimado mediante la diferencia de los valores proyectados en cada uno de los GCMs para periodos de 30 años (2010-2039; 2040-2069; 2070-2099) con respecto a las simulaciones del siglo XX (periodo 1961-1990) de cada modelo (*20th Century Climate Experiment*; 20CM3). No se ha considerado como base de cálculo de la anomalía los datos instrumentales de la cuenca debido a que los CGMs utilizados están calibrados y sesgados respecto la simulación del siglo XX (20CM3). Las anomalías no dependen en ningún modo del modelo de referencia sobre el que están calculadas. De hecho, el cálculo de las anomalías meteorológicas sobre otras series meteorológicas (e.g. instrumentales) introduciría variaciones no dependientes de la circulación atmosférica simulada por los modelos con base física (por ejemplo, eventos no reproducibles por las condiciones climáticas modeladas derivados de utilizar las series instrumentales).

Conocidas las anomalías proyectadas hasta final del siglo XXI, el problema se centra en trasladar las anomalías de los GCMs a la cuenca de estudio. La proyección de las variables meteorológicas locales asociadas a cada escenario de cambio climático se han calculado en base a los datos sintéticos extraídos del modelo de *downscaling* y procedentes del reanálisis del ECMWF para Valdeinfierno. Sobre esta serie sintética se pueden aplicar las anomalías de cada variable meteorológica resultante de los distintos CGMs del IPCC frente al periodo 1961-1990 de la simulación 20CM3. Sin embargo, como se ha comentado en el apartado anterior, las variables de reanálisis utilizadas para definir las series meteorológicas sintéticas comprenden el periodo 1979-2011, y no el periodo 1961-1990 necesario para aplicar la anomalía de las proyecciones de los GCMs. Para corregir el desfase entre el periodo de referencia de los GCMs (20CM3, 1961-1990) y el periodo de considerado en la serie sintética (1979-2012), se ha extraído un periodo equivalente (en días) de la serie sintética (1982-2011), y se ha calculado para las series de datos observados (y en cada estación de registro) la anomalía mensual entre los periodos de 1982-2011 y 1961-1990 que, aplicada sobre las series meteorológicas sintéticas del periodo 1982-2011, permite determinar la series sintéticas del periodo 1961-1990 (Figura 5.5).

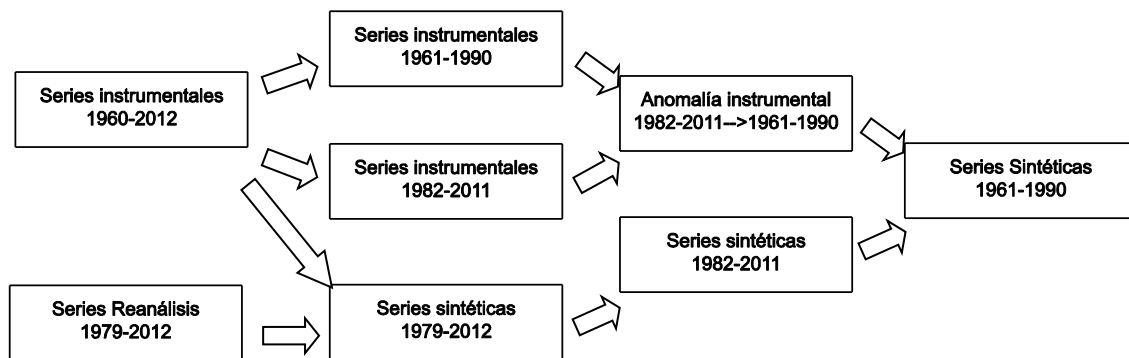


Figura 5.5: Diagrama de flujo del procedimiento para determinar las series meteorológicas sintéticas para el periodo 1961-1990 a partir de las series instrumentales de todas las estaciones de medida instrumental y las series sintéticas calculadas utilizando GLIMCLIM.

Cabe destacar que con esta metodología no se potencia las interrelaciones entre las distintas estaciones, ya que la corrección se hace a escala de cada estación. Las series meteorológicas

sinécticas resultantes son coherentes de los datos observados en las estaciones meteorológicas, aunque dependientes de las variables de circulación calculadas a partir de los datos de reanálisis del ECMWF, y equivalentes a las resultantes del escenario de diseño postindustrial 20CM3 del AR4 del IPCC. Debido a estas propiedades, estas series se denominarán en adelante “series meteorológicas de referencia”, pudiéndose aplicar sobre ellas las anomalías calculadas para la temperatura y la precipitación con los diferentes escenarios de Cambio Climático considerados en los CGMs.

5.2.3. Modelización hidrológica y producción de sedimentos asociada a distintos escenarios de cambio climático

Las series sinécticas de precipitación y temperatura de referencia junto con las anomalías asociadas a los distintos escenarios de cambio climático han permitido simular la hidrología y el transporte de sedimentos en la cuenca del Valdeinfierno durante el siglo XXI. Las anomalías se obtienen a partir de la diferencia de las variables meteorológicas (precipitación y temperatura mensuales) entre el periodo de referencia 20CM3 y los escenarios de emisiones B1, A1B y B2 para cada uno de los GCMs considerados por el IPCC (Tabla 5.8). Dado que la resolución espacial es distinta para cada modelo de circulación (GCM), en cada una de las estaciones meteorológicas de la cuenca de estudio se ha calculado el valor de las anomalías, considerando proporcionalmente la influencia de cada una de las celdas de datos de los GCMs en función de su proximidad a la estación, tal y como se indica en la siguiente expresión (ecuación 5.1).

$$m = \sum_{i=1}^n M_i * \frac{1 - \frac{D_t}{D_i}}{\sum_{i=1}^n 1 - \frac{D_t}{D_i}} \quad \text{tal que; } D_t = \sum_{i=1}^n D_i \quad \text{y} \quad D_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} \quad 5.1$$

Donde:

- m Es la anomalía de la variable meteorológica calculada, en una estación meteorológica.
- n Es el número de celdas del GCM consideradas para el cálculo (en general 4).
- M_i Es el valor de la anomalía de la variable meteorológica, correspondiente a la celda i del GCM utilizado.
- Δx_i Es la distancia entre la coordenada longitudinal de la estación meteorológica considerada, y el centro de la celda i del GCM.
- Δy_i Es la distancia entre la coordenada latitudinal de la estación meteorológica considerada, y el centro de la celda i del GCM.

Aplicando las anomalías (mensuales) de cada GCM sobre la serie sinéctica de referencia (datos diarios escalados con la anomalía) se ha podido implementar el modelo hidrológico y de transporte de sedimentos (TETIS-SED) correspondiente a cada uno de los modelos de circulación considerados. Para las distintas simulaciones, se han utilizado los valores y mapas de propiedades del suelo de los usos más recientes (CORINE *Land Cover*, EEA, 2006), considerándolos constantes a lo largo de todo el periodo de simulación (2011-2099), debido a que en este apartado se pretende exclusivamente determinar la respuesta hidrológica al cambio

climático. Los resultados de las simulaciones hidrológicas para el siglo XXI, se muestran en la Tabla 5.9 y la Figura 5.6.

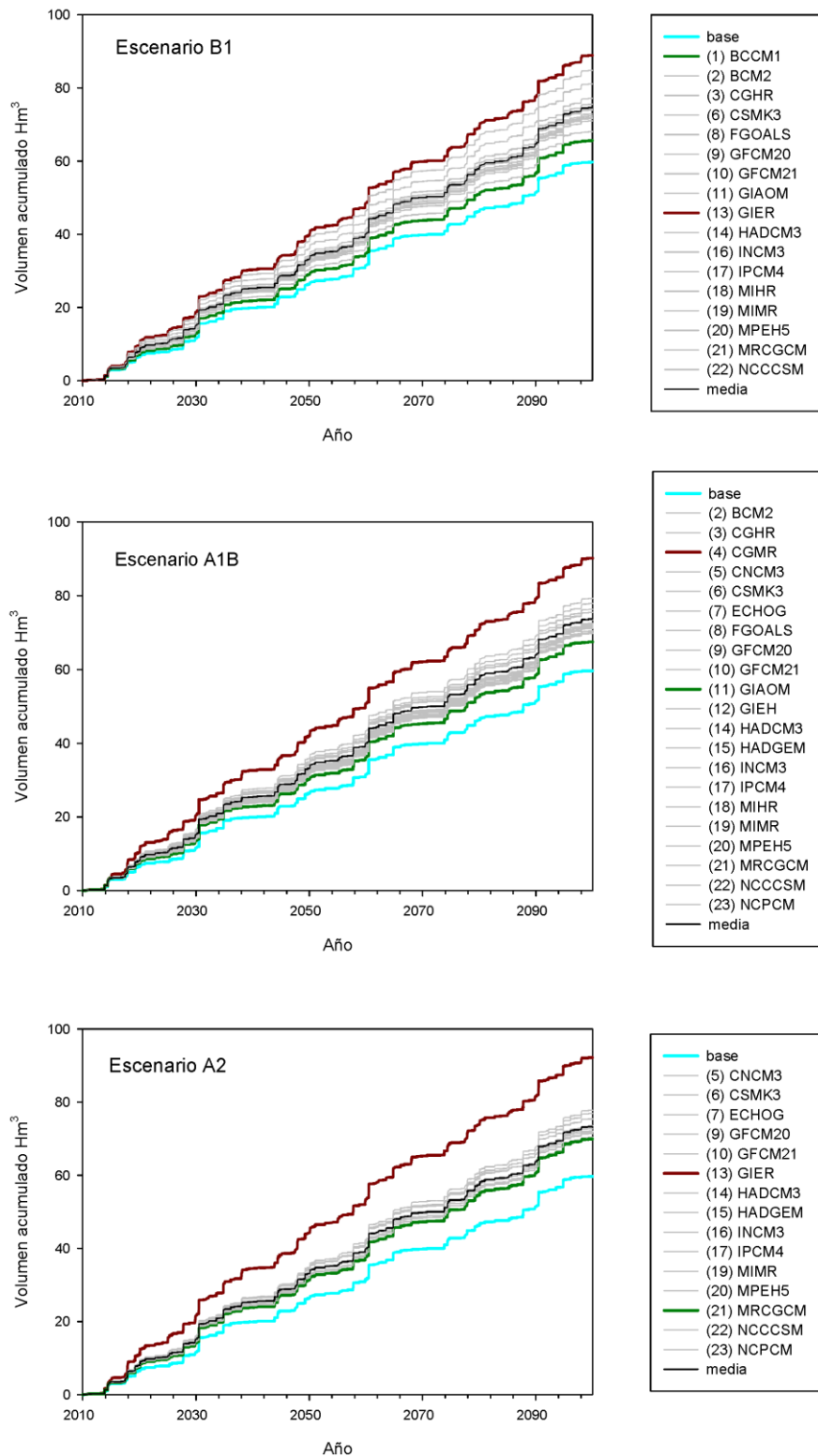


Figura 5.6: Volumen acumulado de la simulación hidrológica en el embalse de Valdeinfierno, a lo largo del siglo XXI, calculado mediante el modelo TETIS, para cada uno de los GCMs en los escenarios B1, A1B, y A2. En los gráficos se resalta las curvas correspondientes al volumen acumulado de la aplicación directa de la meteorología de referencia (base), el modelo que genera el mayor volumen transportado

(GIER en B1 y en A2 y CGMR en A1B), el que genera el menor volumen transportado (BCCM1 en B1, GIAOM en A1B y MRCGCM en A2), y la media de todos los modelos.

Modelo	Escenario B1			Escenario A1B			Escenario A2		
	Q max (m³/s 24h)	Vol. Acum (Hm³)	Media anual (Hm³)	Q max (m³/s 24h)	Vol. Acum (Hm³)	Media anual (Hm³)	Q max (m³/s 24h)	Vol. Acum (Hm³)	Media anual (Hm³)
base	27.146	59.707	0.597	27.146	59.707	0.597	27.146	59.707	0.597
(1) BCCM1	28.289	65.609	0.656						
(2) BCM2	28.341	81.124	0.811	28.272	79.333	0.793			
(3) CGHR	27.922	77.141	0.771	27.949	75.555	0.756			
(4) CGMR				28.160	90.244	0.902			
(5) CNCM3				27.781	75.533	0.755	27.817	75.472	0.755
(6) CSMK3	27.901	72.336	0.723	27.877	71.184	0.712	27.900	70.368	0.704
(7) ECHOG				27.823	72.152	0.722	27.796	72.055	0.721
(8) FGOALS	28.013	72.367	0.724	27.976	71.435	0.714			
(9) GFCM20	27.954	75.538	0.755	27.841	73.497	0.735	27.825	73.553	0.736
(10) GFCM21	27.954	75.538	0.755	27.841	73.497	0.735	27.924	73.412	0.734
(11) GIAOM	28.039	68.025	0.680	28.067	67.520	0.675			
(12) GIEH				27.648	72.549	0.725			
(13) GIER	28.343	88.909	0.889				28.189	92.194	0.922
(14) HADCM3	28.073	84.796	0.848	28.138	75.545	0.755	28.060	75.392	0.754
(15) HADGEM				28.312	76.353	0.764	28.505	76.895	0.769
(16) INCM3	27.947	72.895	0.729	27.978	71.619	0.716	27.943	71.807	0.718
(17) IPCM4	27.821	71.922	0.719	27.804	70.457	0.705	27.834	70.104	0.701
(18) MIHR	28.098	71.638	0.716	28.015	70.011	0.700			
(19) MIMR	28.191	73.999	0.740	28.097	72.320	0.723	28.087	72.748	0.727
(20) MPEH5	27.661	71.672	0.717	27.631	69.916	0.699	27.683	70.078	0.701
(21) MRCGCM	27.799	70.989	0.710	27.884	69.803	0.698	27.798	69.902	0.699
(22) NCCCSM	27.989	74.272	0.743	27.921	71.931	0.719	27.945	71.417	0.714
(23) NCCPCM				28.004	77.921	0.779	27.890	77.755	0.778
media	27.978	74.634	0.746	27.935	73.732	0.737	27.885	73.304	0.733

Tabla 5.9: Valores de caudal máximo, volumen acumulado en el embalse y media de aporte hídrico anual al embalse de Valdeinfierno, durante el periodo 2011-2099, calculados mediante el modelo TETIS, para cada uno de los GCMs en tres escenarios SRES (B1, A1B, y A2). Los valores máximos se marcan en negrita, los mínimos se marcan en sombreado gris claro y los modelos de circulación que no tienen datos para el escenario concreto, se marcan en sombreado gris oscuro.

En la Tabla 5.9 aparecen celdas sin dato (gris oscuro) debido a que no todos los modelos de circulación del repositorio del IPCC presentan datos para los tres escenarios considerados, por lo que no ha podido completarse su modelización hidrológica. En concreto, para un total de 23 GCMs considerados 17 modelos presentan datos para el escenario B1, 21 para el A1B y 15 para el A2 respectivamente).

En general se observa que los GCMs con el mayor volumen hídrico acumulado durante el periodo de proyección presentan un elevado caudal máximo en 24 h, independientemente de los escenarios considerados (Tabla 5.9). Esta coincidencia corrobora lo observado en el periodo instrumental (capítulo anterior) donde se determina una elevada sensibilidad de la hidrología a los eventos de precipitación máxima. Igualmente, la Tabla 5.9 muestra la escasa diferencia entre los valores de caudal máximo obtenidos con los diferentes GCMs, indicando la escasa capacidad de estos modelos para simular correctamente los eventos extremos de precipitación. Se observa que los modelos que proporcionan un menor volumen hídrico acumulado presentan caudales máximos próximos a la media (Tabla 5.9). Esta relación muestra que las anomalías de los GCMs en los distintos escenarios considerados son más determinantes para el volumen hídrico acumulado que para la magnitud del caudal máximo. Esta conclusión pone de manifiesto en la mayor variabilidad que generan los modelos para el volumen hídrico acumulado, con

diferencias de hasta el 29% entre los modelos como mayor y menor volumen total, mientras que las variaciones entre modelos para el caso de los picos máximos es de apenas un 3%. Respecto a las diferencias entre los modelos de circulación de los distintos escenarios de proyección climática, se observa que, mientras que el volumen máximo y mínimo acumulado en cada uno de los escenarios son mayores para los escenarios más desfavorables (mayores emisiones) siguiendo el orden creciente B1, A1B y A2, los picos máximos no siguen esta tendencia (los picos máximo y mínimo del escenario A1B son menores que los del escenario B1).

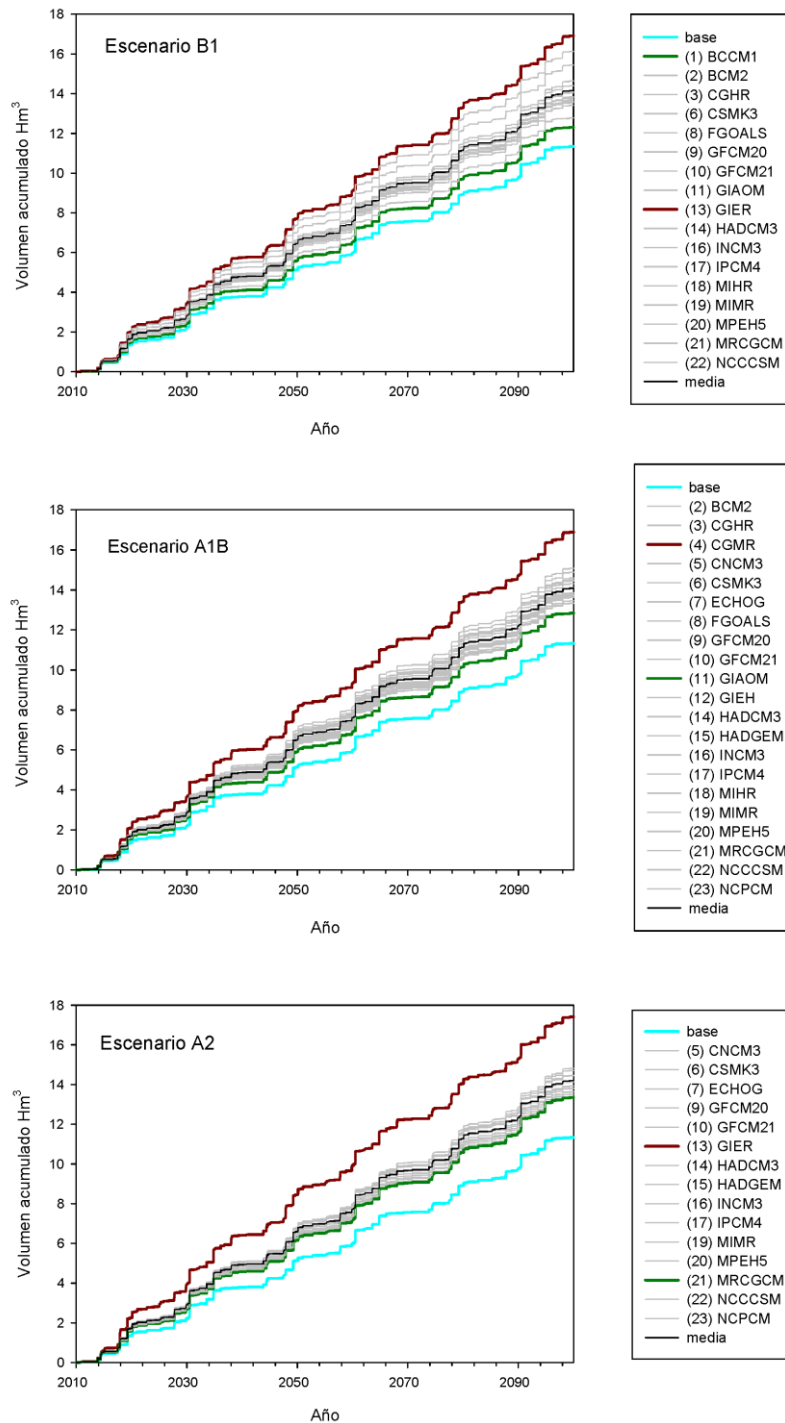


Figura 5.7: Volumen de sedimento acumulado en el embalse de Valdeinfierno, a lo largo del siglo XXI, calculado mediante el módulo TETIS-SED, para cada uno de los GCM considerados en el AR4 y en tres escenarios SRES (B1, A1B y A2). En los gráficos se resaltan las siguientes curvas: Azul: resultado de aplicar la meteorología de referencia (base); Roja: el modelo que genera el mayor volumen transportado (GIER en B1 y en A2 y CGMR en A1B); Verde: modelo que genera el menor volumen transportado (BCCM1 en B1, GIAOM en A1B y MRCGCM en A2); Negro: la media de todos los modelos.

Modelo	Escenario B1				Escenario A1B				Escenario A2			
	Q max (m³/s 24h)	Vol. Acum (Hm³)	Erosión anual (t/Ha)	Media anual (Hm³)	Q max (m³/s 24h)	Vol. Acum (Hm³)	Erosión anual (t/Ha)	Media anual (Hm³)	Q max (m³/s 24h)	Vol. Acum (Hm³)	Erosión anual (t/Ha)	Media anual (Hm³)
base	4.453	11.338	2.722	0.113	4.453	11.338	2.722	0.113	4.453	11.338	2.722	0.113
(1) BCCM1	4.634	12.314	2.957	0.123								
(2) BCM2	5.964	15.449	3.709	0.154	5.871	15.082	3.621	0.151				
(3) CGHR	5.631	14.636	3.514	0.146	5.722	14.310	3.436	0.143				
(4) CGMR					6.116	16.894	4.056	0.169				
(5) CNCM3					5.778	14.460	3.472	0.145	5.888	14.453	3.470	0.145
(6) CSMK3	5.478	13.790	3.311	0.138	5.511	13.699	3.289	0.137	5.528	13.510	3.244	0.135
(7) ECHO					5.922	13.861	3.328	0.139	5.803	13.823	3.319	0.138
(8) FGOALS	5.311	13.699	3.289	0.137	5.568	13.634	3.273	0.136				
(9) GFCM20	5.687	14.397	3.457	0.144	5.774	14.112	3.388	0.141	5.827	14.179	3.404	0.142
(10) GFCM21	5.687	14.397	3.457	0.144	5.774	14.112	3.388	0.141	6.071	14.132	3.393	0.141
(11) GIAOM	4.947	12.778	3.068	0.128	5.120	12.843	3.084	0.128				
(12) GIEH					5.631	13.842	3.323	0.138				
(13) GIER	6.235	16.909	4.060	0.169					6.625	17.408	4.180	0.174
(14) HADCM3	6.054	16.122	3.871	0.161	5.829	14.503	3.482	0.145	5.881	14.468	3.474	0.145
(15) HADGEM					5.843	14.592	3.504	0.146	5.770	14.704	3.530	0.147
(16) INCM3	5.439	13.848	3.325	0.138	5.492	13.741	3.299	0.137	5.561	13.800	3.313	0.138
(17) IPCM4	5.467	13.626	3.272	0.136	5.587	13.460	3.232	0.135	5.444	13.395	3.216	0.134
(18) MIHR	5.402	13.545	3.252	0.135	5.406	13.329	3.200	0.133				
(19) MIMR	5.659	14.053	3.374	0.141	5.678	13.839	3.323	0.138	5.705	13.929	3.344	0.139
(20) MPEH5	5.438	13.604	3.266	0.136	5.405	13.356	3.207	0.134	5.541	13.403	3.218	0.134
(21) MRCGCM	5.284	13.412	3.220	0.134	5.426	13.337	3.202	0.133	5.342	13.347	3.204	0.133
(22) NCCCSM	5.490	14.105	3.387	0.141	5.607	13.772	3.307	0.138	5.382	13.634	3.273	0.136
(23) NCCPCM					5.786	14.887	3.574	0.149	5.726	14.824	3.559	0.148
media	5.504	14.158	3.399	0.142	5.659	14.079	3.380	0.141	5.738	14.201	3.409	0.142

Tabla 5.10: Producción de sedimento modelados mediante TETIS-SED para diferentes GCM y tres escenarios SRES considerados en el AR4. Se muestran los valores de producción de sedimento máximo diario, volumen total acumulado, tasa de producción anual (t/Ha) y la media anual (t) estimados en el embalse de Valdeinfierno, y para el periodo 2011-2099. En negrita se subrayan los valores máximos de cada uno de los parámetros hidrológicos. En sombreado gris claro se indican los valores mínimos de cada parámetro de la producción de sedimento. En sombreado gris oscuro se indica que los datos del modelo GCM no están disponibles y que no ha podido incorporar en el modelo hidrológico-sedimentario.

Analizando los resultados individuales en cada modelo GCM considerando los tres escenarios de proyección de clima, se observa que en la mayoría de ellos el volumen acumulado disminuye en los escenarios de mayores emisiones mientras que los caudales máximos aumentan siguiendo el aumento de emisiones (B1, A1B y A2). Estas tendencias también son observables en los valores medios de volumen acumulado y caudal máximo (última fila de la Tabla 5.9).

En la Figura 5.6 se observa que las curvas del volumen hídrico acumulado para todos los modelos de cambio climático se encuentran por encima del escenario base (línea azul, basada en la precipitación y temperatura sintéticas del periodo de referencia 1961-1990; sin anomalía), indicando que el cambio climático proyectado en cualquiera de los escenarios aumenta la esorrentía acumulada en nuestra cuenca. Este resultado parece contradecir los estudios sobre el impacto del cambio climático en los recursos hídricos en la cuenca del Segura, que estiman una reducción de la esorrentía de entre el 6 y el 12% dependiendo del escenario de emisiones utilizado (Iglesias et al., 2005). Esta contradicción no es tal puesto que la desviación de la serie hidrológica calculada con datos instrumentales respecto a la calculada con las series sintéticas es

muy superior a las variaciones en la escorrentía planteadas por Iglesias et al. (2005) (~30% frente a un máximo de 12%). Además, la serie sintética de precipitación no contempla los eventos máximos (los cuales son minimizados por el GLIMCLIM), y que constituyen un elemento importante en la generación de la escorrentía y el transporte de sedimentos en la cuenca de Valdeinfierno. En la Figura 5.6, se observa que pese a que en todos los escenarios hay mayor densidad de curvas entre el mínimo (línea verde) y el medio (línea negra) que entre el medio y el máximo (curva roja), esta diferencia se acentúa progresivamente desde el escenario más conservador (B1) al más desfavorable (A2). Esta característica de las curvas no se puede explicar como una singularidad de un modelo de circulación particular, ya que el modelo que marca el caudal máximo (al igual que el que marca el mínimo) no es el mismo entre los tres escenarios. Igualmente, tampoco se puede atribuir a que existen modelos más extremos en los escenarios más desfavorables, ya que el modelo de circulación con volumen acumulado mayor en el escenario B1 y A2 es el mismo (Modelo GIER), y el GCM asociado al mayor caudal diario (Q max) coincide en los escenarios A1B y A2 (Modelo HADGEM).

La relación entre los extremos de las curvas de volumen hídrico acumulado con mayor y menor escorrentía del escenario B1, son menores que los respectivos extremos en el escenario A1B, y a la vez menores que en el A2 (Tabla 5.9 y Figura 5.6). La diferente amplitud de la respuesta al escenario climático muestra una dependencia respecto a la magnitud del cambio climático y, por tanto, a la emisión de gases con efecto invernadero a lo largo del siglo XXI.

En los resultados del transporte de sedimentos (Tabla 5.10 y Figura 5.7), se identifican tendencias y resultados parecidos a los observados en la hidrología, con la salvedad de que los picos de sedimento (escalones en Figura 5.7) son más escasos y se concentran en los momentos de los eventos hidrológicos, debido a que no todos los eventos en los que se produce escorrentía tienen la suficiente capacidad erosiva a nivel de cuenca. Por este motivo, los picos máximos influyen en mayor medida sobre la sedimentología que en la hidrología.

El análisis numérico de los valores característicos del volumen de sedimentos presentados en la Tabla 5.10 indican que, al contrario que en la hidrología, en la simulación de sedimentos hay coincidencia entre el GCM que genera el mayor pico de transporte en 24h y el mayor volumen de sedimento acumulado. Esta relación también se observa entre el GCM que genera menor pico en 24 h de sedimento y el de menor volumen de sedimento acumulado en los tres escenarios. Además los GCMs con volumen total y pico de sedimento más (y menos) elevado coinciden con los de mayor (y menor) volumen hídrico acumulado.

Comparando el conjunto de los valores mínimo y máximo entre los distintos escenarios de cambio climático, se observa que mientras que el volumen acumulado de caudal líquido máximo y mínimo en cada uno de los escenarios es mayor para los escenarios más desfavorables (mayores emisiones) siguiendo el orden creciente B1, A1B y A2, el volumen de sedimentos transportados calculados no sigue esta tendencia, sino que depende de la presencia de picos máximos (tanto hidrológicos como de sedimentos). En nuestro análisis, el volumen acumulado máximo en el escenario A1B es ligeramente menor que en el escenario B1. Igualmente, para un

mismo modelo GCM, la producción de sedimento no sigue una tendencia creciente paralela a con los escenarios de menor a mayor emisión. En el caso de los valores medios obtenidos para cada escenario, el incremento de la media de producción de sedimentos (pico y volumen acumulado) se establece según la siguiente relación: $A2 > B1 > A1B$ (última línea Tabla 5.10).

Al igual que en la hidrología, las curvas simuladas de volumen de sedimento son en todos los casos mayores que el sedimento estimado con la serie de referencia sin considerar anomalías climáticas (curva azul; Figura 5.7). Igualmente, se observa que en todos los escenarios hay mayor densidad de curvas entre el mínimo y el medio que entre el medio y el máximo, y que esta diferencia se acentúa progresivamente desde el escenario más conservador (B1) al más desfavorable (A2).

En la Tabla 5.10 se observa que, la curva de volumen acumulado del GCM que menos sedimento genera en el escenario B1, es menor que en el escenario A1B. Por otro lado, la curva de volumen acumulado del GCM que más sedimento genera es mayor en B1 que en A1B, aunque muy próxima. En todo caso ambas curvas son menores que las de A2, indicando que el volumen de sedimento generado y transportado en la cuenca de Valdeinfierno depende de la emisión de gases con efecto invernadero a lo largo del siglo XXI, aunque en menor medida que en la hidrología.

Respecto a la tasa media de erosión anual, las simulaciones para distintos GCM indican valores situados entre 2.96 y 4.18 t/Ha, siendo del mismo orden de magnitud que los obtenidos durante el periodo instrumental para intervalos carentes de eventos hidrológicos importantes (e.g. 2001-2009, 3.15 t/Ha) e inferiores a periodos con eventos extremos (e.g. 1971-1976, hasta 38 t/Ha). Igualmente, las tasas de erosión anual proyectadas para el siglo XXI son similares a las calculadas durante el periodo instrumental mediante diferentes métodos en zonas próximas al área de estudio (Avedaño, 1997; de Vente et al., 2005), y a las estimadas mediante cubillaje de sedimento (estudio batimétrico) del embalse de Valdeinfierno (CEDEX, 1976, 1984, 1995a).

Según todos los resultados expuestos se puede concluir que la aplicación de la anomalía de distintos modelos de circulación climática, en función de los tres escenarios de cambio climático considerados, genera en la cuenca un aumento generalizado de la esorrentía respecto a la hidrología sintética de referencia, que se debe principalmente al aumento de frecuencia en lluvias de baja magnitud y a la ausencia de eventos extremos. Respecto a los sedimentos, la aplicación de anomalías de cambio climático destaca la alta sensibilidad de la erosión frente a los cambios en el clima (mayor que en la hidrología). Del mismo modo, el aumento del volumen acumulado de esorrentía en los modelos de cambio climático implica un aumento considerable de la erosión simulada respecto a la sintética de referencia, pero una reducción de la tasa de erosión anual respecto a la media del periodo instrumental (entre 2.96 y 4.18 t/Ha*año frente a una media de 8.36 t/Ha*año en periodo instrumental).

Las tasas anuales de erosión estimadas a lo largo del siglo XXI son similares a las mínimas del periodo instrumental, en parte debido a la ausencia de picos de elevada magnitud en las series meteorológicas de referencia.

Todos los resultados, fruto de la comparación entre los distintos modelos de circulación atmosférica en función de los distintos escenarios de cambio climático, determinan un subgrupo de modelos de circulación climática que permiten acotar un rango orientativo y representativo del conjunto de los posibles valores de volumen de caudal y sedimento en la cuenca de estudio, considerando los usos del suelo actuales. Este rango está definido por el valor máximo y mínimo del volumen acumulado (agua y sedimento) en cada uno de los escenarios y el modelo de circulación global al que pertenece dicho valor. Se ha seleccionado un total de ocho modelos climáticos que incluyen la totalidad de los resultados representativos de los valores medios, máximos y mínimos de caudal y sedimentos, así como de los picos máximos (Tabla 5.11).

	B1	A1B	A2
Valor máximo	GIER	CGMR	GIER
Valor medio	NCCCSM	GFCM20	GFCM20
Valor mínimo	BCCM1	GIAOM	MRCGCM
Valor pico	GIER	HADGEM	HADGEM

Tabla 5.11: Modelos de circulación climáticos seleccionados como representativos para los tres escenarios de cambio climático considerados.

5.2.3.1. Efecto de los distintos escenarios de cambio climático en la hidrología y el transporte de sedimentos considerando picos extraordinarios de caudal

Las series de precipitación obtenidas para los diferentes escenarios de cambio climático introducidas en la simulación hidrológica y sedimentológica en la cuenca de Valdeinfierno muestran la falta de picos de elevada magnitud. En concreto los picos máximos de caudal durante el periodo simulado no superan los 30 m³/s día en ninguno de los escenarios (Tabla 5.9).

Comparando las series hidrológicas simuladas para los escenarios de cambio climático con las series de caudal y transporte de sedimentos registrados durante el periodo instrumental, se concluye que la falta de picos de avenida en las series simuladas hace que las proyecciones futuras de caudal de agua y transporte de sedimento sean muy conservadoras.

El análisis de las series histórica e instrumental muestran la existencia de avenidas de magnitud elevada, como la ocurrida en 1973, la mayor de la serie instrumental, a la que Conesa García (1985) le asigna un periodo de retorno de 120 años. En el periodo histórico se describen otras avenidas de magnitud similar, en concreto las producidas en 1838 y 1879 (Benito et al., 2004a; Benito et al., 2010) y que presentarían, por tanto, una recurrencia media inferior a 80 años (Tabla 5.12). La carencia de eventos de esta magnitud en las series simuladas en las

proyecciones de cambio climático demuestra la limitación de los modelos globales de circulación atmosférica en la simulación de eventos extremos a escala local.

En un primer paso, se analizan las características de magnitud y frecuencia de los eventos extremos en la zona de estudio durante el periodo instrumental (1971-2012), para posteriormente determinar la respuesta hidrológico-sedimentaria de estos extremos, incorporando alguno de ellos en las series proyectadas dentro de los escenarios de cambio climático.

Año	Fecha	Magnitud relativa	Comentarios	caudal registrado en la presa de Puentes, Q (m ³ /s)	Caudal mínimo calculado por Benito et al.(2010), Q (m ³ /s)
1568	17 de Septiembre	Catastrófica	–	–	625
1648	5 de Agosto	Ordinaria	Daños en los cimientos de la presa de Puentes	–	–
1651	14 de Octubre	Catastrófica	Inundación de San Calixto	–	640
1653	4 de Noviembre	Catastrófica	Inundación de San Severo	–	680
1704	27 de Agosto	Extraordinaria	Inundación de San Leovigildo	–	–
1728	29 de Octubre	Catastrófica	–	–	–
1733	3 de Septiembre	Catastrófica	Inundación de N ^o S ^a de los Reyes	–	730
1802	30 de Abril	Ordinaria	2 ^a rotura de la presa de Puentes	–	–
1830	3 de Septiembre	Extraordinaria	–	–	–
1831	19 de Octubre	Extraordinaria	Inundación de La Diforme	–	760
1838	3 de Octubre	Catastrófica	Inundación de San Francisco	–	810
1860	17 de Septiembre	Catastrófica	–	–	870
1877	19 de Septiembre	Extraordinaria	Inundación de San-Cosme y San Damián	–	880
1879	14 de Octubre	Catastrófica	Inundación de Santa Teresa	1510	915
1880	28 de Agosto	Catastrófica	–	–	–
1884	22 de Mayo	Catastrófica	Inundación de la Ascensión	1136	–
1891	11 de Septiembre	Ordinaria	Inundación de San Jacinto	1890	940
1898	16 de Enero	Extraordinaria	Inundación de San Fulgencio	–	–
1900	27 de Junio	Ordinaria	Inundación de San Aniceto	1295	–
1921	24 de Septiembre	Ordinaria	Inundación de la Virgen de las Mercedes	1005	–
1941	28 de Junio	Ordinaria	–	1378	980
1973	19 de Octubre	Catastrófica	–	3544	1035–1616

Tabla 5.12: Principales avenidas ocurridas en la cuenca alta del Río Guadalentín obtenidas del registro histórico (Archivo Municipal de Lorca y Embalse de Puentes) y del registro de paleoavenidas reconstruido aguas arriba del Embalse de Valdeinfierno. Los caudales pico corresponden a los registrados en el Embalse de Puentes y a los reconstruidos con los datos de paleoavenidas (Tabla modificada de Benito et al.(2010).

El análisis de frecuencia se ha realizado usando los datos de precipitación diaria máxima anual debido a que son más continuos y robustos que los datos de caudal. Igualmente, las precipitaciones no están influenciadas por los cambios de uso del suelo en la cuenca, que podrían alterar la escorrentía y el caudal aforado en el embalse de Valdeinfierno. La serie de lluvias máximas diarias se ha ajustado a una función de distribución SQRT-ET max (*SQare-RooT Exponential Type distribution of Maximum*) desarrollada por Etoh et al. (1987). Esta distribución SQRT-ET max se utiliza frecuentemente en el ámbito Mediterráneo para el cálculo de los cuantiles asociados a

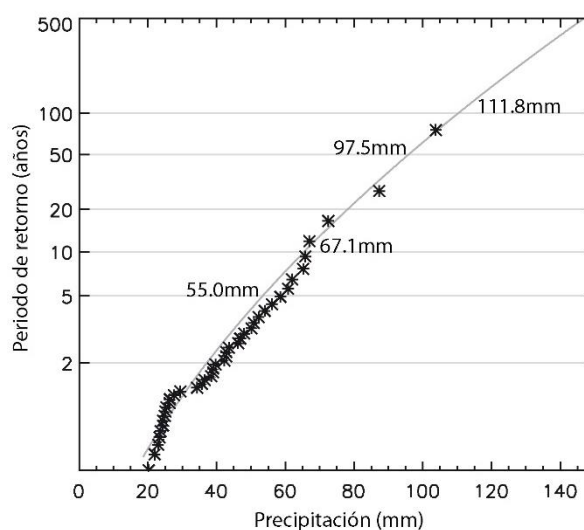


Figura 5.8: Periodo de retorno de la precipitación máxima anual calculado utilizando la función de distribución SQRT-ET Max (Etoh et al., 1987) en base a los datos de precipitación diaria de la AEMET para el periodo 1971-2012.

eventos máximos (Ferrer, 1996; CEDEX, 1999; Salas, 2004 ;Figura 5.8)

La Figura 5.8 muestra un buen ajuste entre los datos y la función de distribución SQRT max. Según este ajuste, la lluvia que originó la avenida de 1973 presenta un periodo de retorno ligeramente inferior a los 100 años. Por tanto, es razonable considerar que al menos una precipitación de magnitud similar se puede producir a lo largo del siglo XXI, aunque el intervalo de recurrencia podría variar según los modelos. La Tabla 5.13 presenta los resultados referentes a la hidrología y la sedimentología derivadas de incluir un único pico de precipitación de 100 años de periodo de retorno en cada uno de los modelos de circulación global y en los tres escenarios SRES considerados. En cada modelo GCM y escenario se han simulado tres series:

- (1) evento extraordinario en el intervalo 2010-2039
- (2) evento extraordinario en el intervalo 2040-2069
- (3) evento extraordinario en el intervalo 2070-2099.

La disposición temporal del fenómeno dentro de cada intervalo temporal se ha fijado siguiendo una secuencia similar a la del evento de 1973, y estacionalmente como una precipitación de otoño (63.6% de los eventos extraordinarios presentes en la Tabla 5.12).

Escenario	Modelo	Periodo del pico	Hidrología			Sedimentología			
			Q max (m³/s 24h)	Vol. Acum (Hm³)	Media anual (Hm³)	Q max (m³/s 24h)	Vol. Acum (Hm³)	Erosión anual (t/Ha)	Media anual (Hm³)
B1	01. BCCM1	2010-2039	165.131	84.510	0.845	52.922	16.255	3.903	0.163
		2040-2069	165.306	89.042	0.890	53.150	17.231	4.137	0.172
		2070-2099	164.936	91.472	0.915	52.929	17.685	4.246	0.177
	13. GIER	2010-2039	180.399	105.626	1.056	61.044	20.200	4.850	0.202
		2040-2069	177.306	99.207	0.992	59.675	18.896	4.537	0.189
		2070-2099	175.549	95.494	0.955	58.868	18.133	4.354	0.181
	22. NCCCSM	2010-2039	170.795	95.658	0.957	56.301	18.478	4.436	0.185
		2040-2069	170.914	94.884	0.949	56.494	18.369	4.410	0.184
		2070-2099	169.605	104.070	1.041	55.720	20.047	4.813	0.200
A1B	04. CGMR	2010-2039	119.720	101.247	1.012	42.318	18.260	4.384	0.183
		2040-2069	169.781	97.642	0.976	56.164	18.426	4.424	0.184
		2070-2099	168.874	98.645	0.986	55.479	18.690	4.487	0.187
	09. GFCM20	2010-2039	172.128	94.579	0.946	56.881	18.259	4.384	0.183
		2040-2069	169.479	92.432	0.924	55.591	17.930	4.305	0.179
		2070-2099	168.094	102.131	1.021	54.489	19.172	4.603	0.192
	11. GIAOM	2010-2039	167.943	100.147	1.001	53.774	19.187	4.607	0.192
		2040-2069	166.018	89.531	0.895	52.755	17.213	4.133	0.172
		2070-2099	165.238	90.374	0.904	52.269	17.361	4.168	0.174
	15. HADGEM	2010-2039	170.508	95.844	0.958	55.902	18.378	4.412	0.184
		2040-2069	167.870	93.949	0.939	54.496	18.034	4.330	0.180
		2070-2099	165.974	95.201	0.952	52.995	18.213	4.373	0.182
A2	09. GFCM20	2010-2039	171.956	93.979	0.940	56.848	18.233	4.378	0.182
		2040-2069	172.773	94.103	0.941	57.489	18.370	4.410	0.184
		2070-2099	167.914	91.298	0.913	54.473	17.697	4.249	0.177
	13. GIER	2010-2039	182.743	102.482	1.025	62.208	19.296	4.633	0.193
		2040-2069	177.188	113.797	1.138	59.782	21.431	5.145	0.214
		2070-2099	170.319	94.453	0.945	55.920	18.058	4.336	0.181
	15. HADGEM	2010-2039	170.426	93.935	0.939	55.906	17.992	4.320	0.180
		2040-2069	168.564	95.109	0.951	54.777	18.265	4.385	0.183
		2070-2099	168.564	94.333	0.943	54.758	18.137	4.355	0.181
	21. MRCGCM	2010-2039	167.646	92.161	0.922	54.364	17.815	4.277	0.178
		2040-2069	166.531	94.714	0.947	53.769	18.227	4.376	0.182
		2070-2099	163.396	89.330	0.893	51.667	17.127	4.112	0.171

Tabla 5.13: Resultados de la simulación de la hidrología y sedimentología de caudal máximo, volumen acumulado en el embalse, media de aporte anual y erosión media anual, en diferentes horizontes temporales para los próximos 100 años, para cada uno de los GCM de los escenarios SRES considerados en el AR4. En estas simulaciones se ha considerado un pico equivalente al máximo del registro instrumental en distintos periodos del siglo XXI (un único evento en cada modelización). En **negrita** se marcan los valores máximos de cada parámetro y en **sombreado gris claro** se indican los valores mínimos

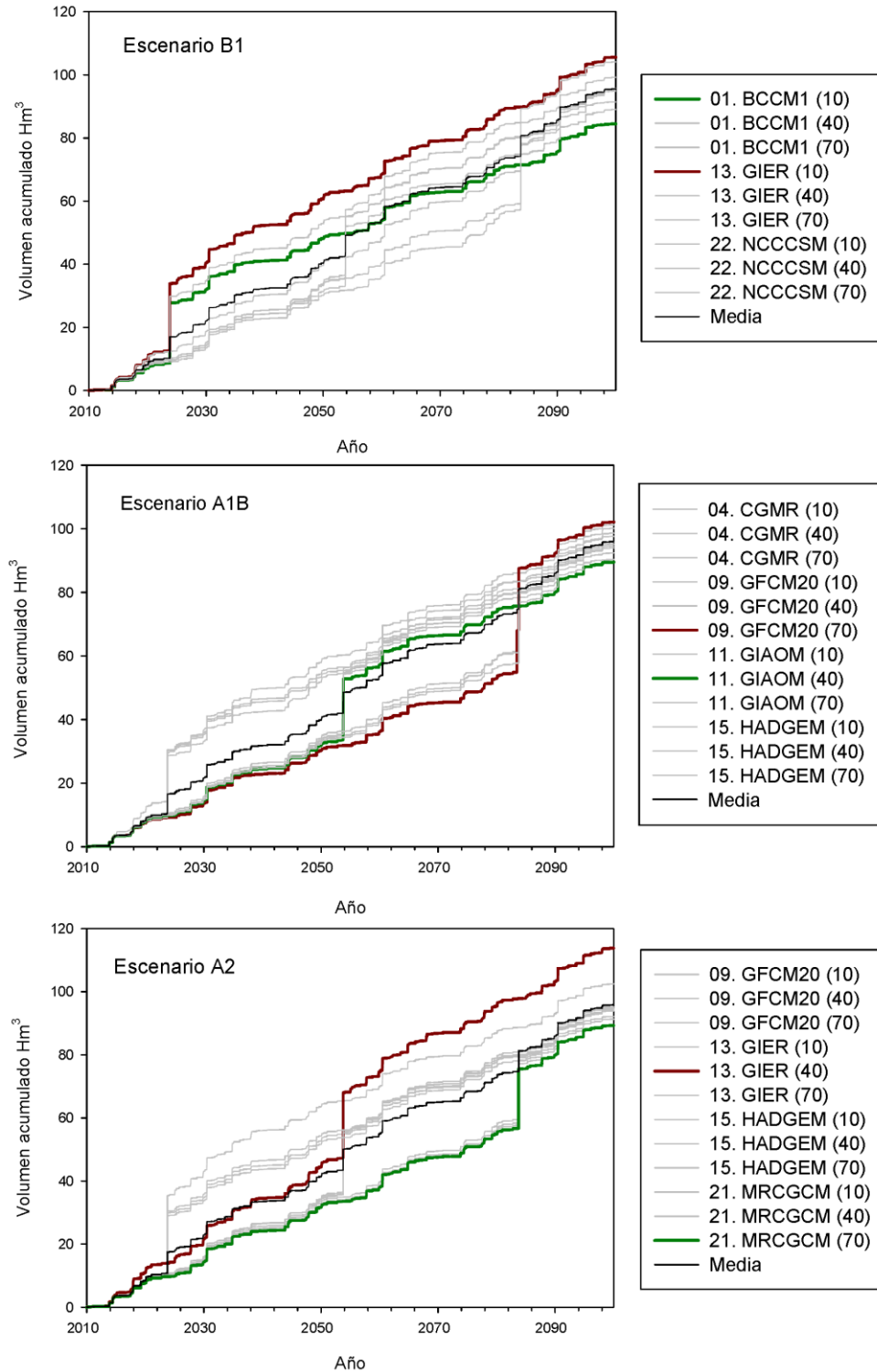


Figura 5.9: Volumen acumulado de la simulación hidrológica en el embalse de Valdeinfierno, a lo largo del siglo XXI, calculados mediante el modelo TETIS, para cada uno de los GCM de los escenarios

SRES considerados en el AR4, considerando un pico equivalente al máximo del registro instrumental en distintos momentos del siglo XXI (un único evento en cada modelización). En los gráficos se indica en rojo, el modelo que genera el mayor volumen transportado, en verde el que genera el menor volumen transportado y en negro la media de todos los modelos.

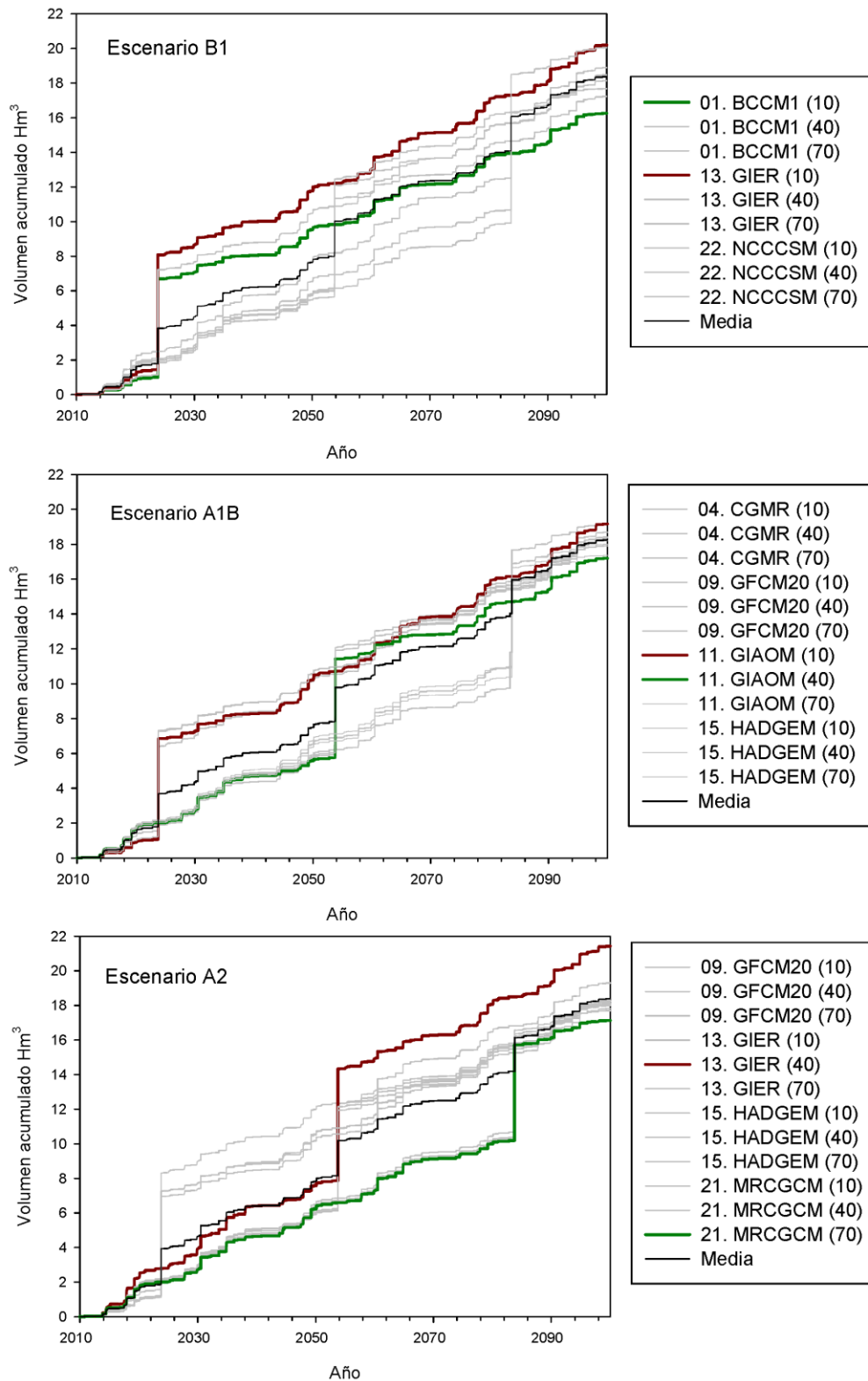


Figura 5.10: Volumen de sedimento acumulado en el embalse de Valdeinfierno, a lo largo del siglo XXI, calculados mediante el módulo TETIS-SED, para cada uno de los GCM considerados en el AR4 y tres escenarios SRES (B1, A1B y A2), considerando un pico equivalente al máximo del registro

instrumental en distintos momentos del siglo XXI (un único evento en cada modelización). En los gráficos se indica en rojo, el modelo que genera el mayor volumen transportado, en verde el que genera el menor volumen transportado y en negro la media de todos los modelos.

En la Tabla 5.13 se observa que los caudales máximos de mayor y menor magnitud de agua y sedimento coinciden en el mismo GCM. Las series modeladas que incluye el pico de periodo de retorno de 100 años (Tabla 5.13) muestran una mayor coincidencia entre el pico mayor y el máximo volumen hídrico acumulado de todos los modelos, que la obtenida en la modelación que no incluyen este evento extremo (Tabla 5.9 y Tabla 5.10). La coincidencia en el GCM que genera el mayor volumen y el máximo caudal es menor en el transporte de sedimentos. Esta relación en cascada “lluvia-escorrentía-sedimento” pone de manifiesto el control que ejercen las precipitaciones máximas en la generación de los picos y volumen de escorrentía, y estos a su vez sobre la producción de sedimento.

En relación con los SRES, el escenario de mayor emisión de gases (A2) contiene los resultados de caudal máximo mayor y menor, y volumen acumulado mayor y menor, que confirma la tendencia de incremento de picos y volúmenes máximos en los escenarios de emisiones más desfavorables. En el escenario A1B se observa una menor amplitud de los valores de las curvas de volumen acumulado (Figura 5.9) y de sedimento (Figura 5.10) respecto a los resultados de las modelaciones hidrológico-sedimentaria realizadas con los escenarios B1 y A2. Esta disminución en la amplitud del rango de resultados de las simulaciones con el evento extraordinario para el escenario A1B constituye una diferencia importante respecto a la modelación que no incluye el pico de 100 años de periodo de retorno (Figs. 5.5 y 5.6). De hecho, la escasa diferencia entre los valores de volúmenes acumulados entre las distintas simulaciones del escenario A1B conlleva que, pequeñas diferencias entre los eventos menores de la serie, invierta o modifique el orden de las curvas de volumen acumulado (agua y sedimento), observándose múltiples cruces entre las curvas (Figura 5.9, y Figura 5.10).

Se ha elaborado una comparación entre la diferencia porcentual de los picos de caudal máximo y mínimo y el volumen transportado máximo y mínimo, considerando todos los CGM de cada escenario de emisiones en presencia del evento de periodo de retorno de 100 años, y de estos con los valores máximos y mínimos resultantes de la simulación sin dicho evento (Tabla 5.14).

Escenario	Diferencias Pico Caudal	Diferencias Pico Sedimento	Diferencias Volumen Agua	Diferencias Volumen Sedimento
B1	8.5%	13.3%	20%	19.5%
A1B	30.4%	25.6%	12.3%	10.3%
A2	10.6%	16.9%	21.5%	20.1%
Máximos respecto a los máximos sin considerar el pico de periodo de retorno de 100 años				
B1	84.3%	89.8%	15.8%	16.3%
A1B	83.5%	89.2%	11.6%	11.9%
A2	84.4%	89.3%	19%	18.8%
Mínimos respecto a los mínimos sin considerar el pico de periodo de retorno de 100 años				
B1	83.2%	91.2%	22.4%	24.2%
A1B	76.9%	87.9%	24.6%	25.4%
A2	83.1%	89.7%	21.7%	22.1%

Tabla 5.14: diferencias entre el valor máximo y mínimo de los valores hidrológicos característicos determinados entre todos los GCM incluidos en cada escenario de emisiones, considerando el evento de periodo de retorno de 100 años, y entre estos resultados y los de la simulación sin el pico de periodo

de retorno de 100 años, para los valores característicos máximo y mínimo de la hidrología y la sedimentología.

Las mayores diferencias de las series con y sin evento extraordinario se obtienen en los valores de picos máximos y mínimos que varían entre el 77-91%, mientras que en el volumen acumulado de agua y sedimento es del 11-25%. En general el escenario A1B presenta menores variaciones que las presentadas en los escenarios B1 y A2. Este comportamiento del escenario A1B indica que en presencia de grandes eventos, existe una alta variabilidad de resultados en dicho escenario dependiendo del modelo GCM elegido.

Respecto a las tasas de erosión (Tabla 5.13), se puede afirmar que independientemente del escenario elegido y del periodo seleccionado, la presencia de un pico de periodo de retorno de 100 años implica un aumento significativo (entre 7- 30 %) de la tasa de erosión a lo largo del mismo periodo de simulación, aunque los valores de erosión anual de las simulaciones de cambio climático siguen siendo menores que la media de este parámetro en periodo instrumental (entre 3.9 y 5.14 t/Ha frente a 8.36 t/Ha).

5.2.4. Determinación de la evolución de la hidrología y el transporte de sedimentos a lo largo del siglo XXI en función del clima.

En el presente capítulo se han aplicado técnicas de *downscaling* estadístico para generar series sintéticas de precipitación y temperatura a escala de cuenca en base a un conjunto de 124 variables de reanálisis atmosférico definidas en el modelo ERA-Interim. A estas series sintéticas se han aplicado las anomalías respecto a las medias mensuales obtenidas con las proyecciones de cambio climático durante el siglo XXI, en base a los resultados de un total de 23 modelos de circulación general de la atmósfera (GCMs) y a tres escenarios de emisiones de gases con efecto invernadero (SRES B1, A1B y A2). Estas series de precipitación y temperatura divididas en tres periodos temporales (2010-2039; 2040-2069; 2070-2099) se han introducido en el modelo hidrológico distribuido TETIS, y de producción de sedimentos TETIS-SED manteniendo los usos de suelo actuales. Las técnicas de *downscaling* estadístico basadas en los resultados de los GCMs han sido utilizadas extensamente en hidrología para conocer los impactos del cambio climático en los recursos hídricos a escala de cuenca (Goodess y Jones, 2002; Iglesias et al., 2005). Sin embargo, su aplicación en estudios del comportamiento de los extremos hidrológicos y la producción de sedimentos en el ámbito Mediterráneo ha sido escasa debido a las limitaciones que presentan los modelos atmosféricos para reproducir cambios en los extremos de precipitación locales (Munoz-Diaz y Rodrigo, 2006; Hertig y Jacobeit, 2008a). Las técnicas de *downscaling* estadístico permiten mejorar las salidas de las series de precipitación obtenidas de los modelos generales de circulación atmosférica (GCMs) incorporando, en su traslación estadística, las condiciones locales, así como elementos de climatología sinóptica que

generan los extremos de precipitación intensa en las estaciones meteorológicas de la cuenca de estudio (Fowler et al., 2007; Beaulant et al., 2011). De cualquier forma, la capacidad de reproducir mediante modelos climáticos los eventos extremos está limitada por la calidad de la información de los GCMs, las variables de reanálisis y por el proceso de transformación de variables meteorológicas, desde celdas de entre 0.75 y 3 grados en latitud y longitud (entre ~7000 y ~111000 Km²), propias de los modelos atmosféricos, a las 13 estaciones meteorológicas de la cuenca de estudio (contenidas en ~500 km²). La evaluación sobre la capacidad del *downscaling* para reproducir series meteorológicas robustas considerando la circulación atmosférica se realiza mediante su comparación con las distintas variables de reanálisis. Este reanálisis representa el equivalente a un GCM solapado temporalmente con las series instrumentales y sobre el que se puede determinar la influencia de la circulación climática sobre las series meteorológicas de observación (Nieto et al., 2004; Simmons et al., 2004; Nuissier et al., 2011). Las variables de reanálisis suponen una herramienta de gran utilidad en la determinación de la meteorología, ya que sus resultados se comparan y corrigen permanentemente con los datos medidos en las estaciones (Dee et al., 2011). Por este motivo las variables obtenidas con el modelo de reanálisis se corresponden en mayor medida con las observaciones, y permiten obtener una meteorología sintética coherente con las tendencias en los datos meteorológicos y la circulación climática observada durante el periodo instrumental a nivel global. La comparación entre la hidrología y el transporte de sedimentos resultante de la simulación, considerando la meteorología observada y sintética para el periodo 1982 y 2011, ha corroborando que las series sintéticas construidas en base a las variables de reanálisis son representativas de la meteorología local en la zona de estudio, aunque en el caso de la precipitación aproximadamente un 30 % menor.

Las simulaciones hidrometeorológicas futuras basadas en el *downscaling* estadístico y las salidas de los distintos GCMs muestran que, para un mismo escenario SRES, las simulaciones que tienen un pico de escorrentía y escorrentía acumulada máximas se encuentran siempre entre las curvas con mayor transporte total de sedimento y viceversa. Esta característica, igualmente observada en el modelo generado por la serie instrumental (ver capítulo anterior), demuestra la importancia de los picos de precipitación y escorrentía en el transporte de sedimentos (Lopez-Bermudez, 1990; Martinez-Mena et al., 2001).

La tendencia futura de los eventos extremos de precipitación intensa, proyectada con los diferentes GCMs, indica una reducción de la erosión de la cuenca en todos los escenarios de emisión de gases con efecto invernadero, respecto a los resultados observados en el periodo instrumental. Los resultados obtenidos de las simulaciones indican que las series meteorológicas generadas mediante las variables de reanálisis minimizan los valores máximos de precipitación registrados en las estaciones instrumentales. Por tanto, los resultados de las proyecciones futuras de volumen total y picos de los caudales líquidos y sólidos constituyen una aproximación conservadora de las tendencias esperables en la cuenca de estudio. Tal y como se ha señalado en los capítulos anteriores, la cuenca alta del río Guadalentín presenta un régimen mediterráneo marcadamente torrencial, y por tanto, el transporte de sedimento depende directamente de la

frecuencia y magnitud de los eventos extremos (Montiel Pinilla, 1955; Gil Olcina, 1968; Benito et al., 2010). Con el fin de emular con mayor precisión este comportamiento, se ha planteado cual sería el efecto de la incorporación de un evento extremo como el ocurrido en 1973, para el cual se ha determinado un periodo de retorno de 100 años. Incluyendo el evento extraordinario en los distintos GCMs de los posibles escenarios de cambio climático, en distintos periodos de ocurrencia del evento, se ha observado que en los todos los escenarios aumenta el volumen transportado y el pico máximo de transporte, tanto en hidrología como en sedimentos, respecto a los mismos periodos sin considerar el evento. Se ha observado que en los escenarios extremos (más favorable B1 y menos favorable A2) el pico de caudal y transporte de sedimentos máximos y los volúmenes finales de transporte coinciden en el mismo GCM entre las simulaciones con y sin pico, con un aumento de volumen final transportado entre el 15 y el 20 % superior. Estos resultados indican que para ambos escenarios la presencia de un pico de gran magnitud determina el transporte máximo, coincidiendo con el comportamiento hidrológico de la cuenca durante el periodo instrumental descrito en el capítulo anterior.

La tendencia de la dispersión de las curvas acumuladas de agua y sedimento en el escenario intermedio A1B es parecida a la identificada en las simulaciones sin incorporar el evento máximo. Se observa que en el escenario A1B, el evento extraordinario (T=100 años) tiene menos peso en la generación de los picos máximos que en los otros dos escenarios (A2 y B1). Estos resultados indican un comportamiento en la precipitación del escenario intermedio A1B distinto al de los escenarios extremos, e implica que los impactos hidrológicos del cambio climático, en relación a este escenario, son mucho menos previsibles que para escenarios extremos (Sun et al., 2007; Boberg et al., 2010). En general, las diferencias que se obtienen de aplicar los resultados de los diferentes GCMs escasas, y siguen una tendencia hacia el aumento en la erosión de la cuenca relativamente proporcional a las emisiones de gases de efecto invernadero, pese a ser, en todos los GCM de los distintos escenarios, más reducida que la registrada en el periodo instrumental.

5.3. Escenarios de evolución de los usos del suelo y su influencia en la respuesta hidrológica y sedimentaria

A lo largo del presente estudio se ha constatado que la producción de sedimento en la cuenca hidrográfica vertiente al embalse de Valdeinfierno es altamente susceptible a las variaciones en la gestión y el uso de los suelos. Esta característica implica que la proyección de las tasas de producción de sedimento a lo largo del siglo XXI no se puede abordar independientemente de una proyección de posibles vías de evolución de los usos del suelo en la cuenca de estudio (Morgan et al., 1998; Kundzewicz y Schellnhuber, 2004; Baartman et al., 2013).

La proyección hacia el futuro de posibles escenarios de usos del suelo, en adelante configuraciones de usos del suelo para evitar confusiones con los escenarios de cambio

climático, representa una tarea compleja ya que las variaciones en la ocupación del suelo no son fácilmente predecibles, debido a que dependen de movimientos demográficos y políticas socio-económicas externas al medio natural (Aguirre Segura et al., 1997; Barriandos, 1997; Arnold et al., 1998). En el presente apartado, se han definido cinco posibles vías o configuraciones de evolución de los usos del suelo, utilizando como punto de partida la clasificación de suelos del año 2006 (EEA, 2006) descrita en el capítulo 4. Cada línea de evolución del uso del suelo progresa en relación a los intervalos de modelización de 30 años coincidentes con los aplicados a los GCMs del apartado anterior. Las variables determinantes para la evolución de los usos del suelo han tenido en cuenta la evolución temporal histórica de la vegetación en los espacios naturales de la cuenca y las posibles vías de evolución demográfica en función de distintos escenarios socio-económicos.

5.3.1. Configuraciones de usos del suelo

Las configuraciones de usos del suelo elaboradas para la simulación de las distintas vías de evolución de la cuenca se han clasificado según criterios demográficos, de mayor a menor uso del suelo destinado a la agricultura definiendo dos posibles vías. La primera vía considera un aumento de la población dedicada a la actividad agraria respecto a la situación actual, mientras que la segunda considera una tendencia al abandono masivo de los cultivos actuales.

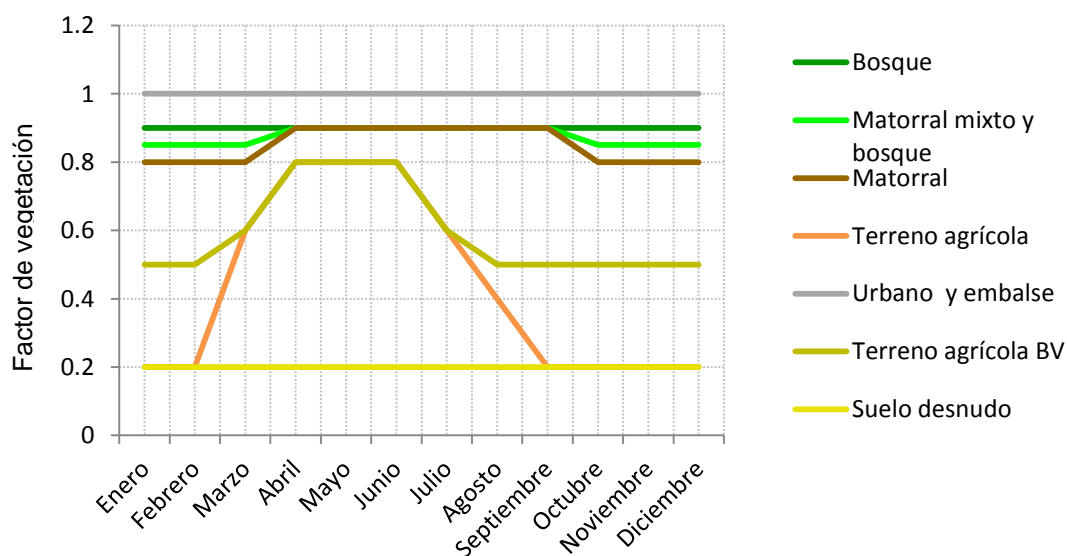


Figura 5.11: Valores de los factores de vegetación estacionales (adimensionales) introducidos como dato en el modelo TETIS, en los que a las categorías de usos del suelo previamente definidas, se les ha añadido las dos nuevas coberturas "Terreno agrícola con Barbecho verde" y "Suelo desnudo".

En el caso del aumento de las tierras destinadas a la agricultura, cabe esperar que los cultivos y labores introducidas estén condicionadas por las subvenciones de la política agraria común de la Unión Europea (PAC), y que se prevé que fomenten prácticas agrícolas de conservación de los

suelos en un futuro próximo (European-Comision, 2012b; EEA, 2013; European-Comision, 2013b, a). En el caso de la vía con tendencia al abandono, cabe esperar que los primeros estadios del abandono tengan un comportamiento hidrológico y de erosión similar a la de un suelo desnudo, tal y como se ha puesto de manifiesto de diversos estudios experimentales del ámbito mediterráneo (Calatrava et al., 2011; Garcia-Ruiz y Lana-Renault, 2011). A efectos de incluir estos cambios esperables en los usos de suelo dentro de la modelación hidrológica se han incorporado dos nuevos usos de suelo bajo los términos "Terreno agrícola BV" o barbecho verde y "Suelo desnudo", cuyo comportamiento estacional se expone en la Figura 5.11.

El nuevo uso denominado "Terreno agrícola BV", se caracteriza por mantener la práctica del cultivo de cereal durante los meses de actividad vegetativa y por mantener el resto del año el suelo cubierto mediante la siembra de alguna planta mejorante del suelo, generalmente de forraje, proporcionando una cosecha adicional. En el caso del nuevo uso denominado "Suelo desnudo", se caracteriza, tal y como indica el nombre, por no contener vegetación. Dado que a priori se desconoce la distribución de los cambios en los usos del suelo, se han utilizado algunos criterios comunes para describir la evolución espacial y temporal de los distintos escenarios:

- En lo relativo a la evolución natural de los sectores actualmente con matorral, se ha asumido que en cada uno de los tres intervalos de modelización hidrológica de 30 años se produce una línea de evolución hacia la categoría "Matorral & Bosque" y a partir del segundo intervalo a la categoría "Bosque". Lo mismo sucede con la nueva categoría "suelo desnudo", que se ha considerado que a partir del primer intervalo sin vegetación, evolucionará a la categoría "matorral" y posteriormente sigue la línea evolutiva indicada (Moran-Tejeda et al., 2010). Esta evolución natural se ha concebido partiendo de la base de que la vegetación de bosque se compone principalmente de coníferas (pino, mayoritario) y diferentes tipos de *Quercus* (encinas, minoritario), mientras que la vegetación arbustiva comprende matorrales esclerófilos mediterráneos (MINISTERIO DE AGRICULTURA, 1976c, a, d, b; EEA, 1995; Junta_de_Andalucía, 2003). De acuerdo a las tasas de crecimiento "normal" de la vegetación mayoritaria, resulta razonable asumir cambios entre categorías (matorral-bosque) en periodos de 30 años (Breshears, 2006; Aparicio et al., 2008; Gimeno et al., 2012).
- En lo relativo a las parcelas cultivada de la cuenca, debido a la falta de información y a la incertidumbre sobre en las variables socio-económicas, se ha considerado el aumento o reducción de su extensión en función de la pendiente. De modo que en el caso de un hipotético abandono de cultivos, este se va a producir preferentemente en zonas de mayor pendiente (por las dificultades y costes de cultivo en pendientes elevadas). Consecuentemente, en caso de un hipotético aumento de zonas cultivadas se producirá en las zonas de menor pendiente. Conviene indicar que las zonas actuales de bosque no se espera que se modifiquen ya que, tal y como se ha indicado en el capítulo anterior, su práctica totalidad es de titularidad pública.

- En lo relativo a las zonas urbanas no se han considerado cambios respecto a la actualidad, puesto que es poco probable que dichas zonas sean reutilizadas para otros usos, y la extensión urbana actual es suficiente para absorber los aumentos demográficos considerados.

La proporción y las características de cada uno de los usos, así como los criterios seguidos para la determinación de su distribución en detalle, se expone separadamente en cada uno de las configuraciones de usos del suelo previstos.

5.3.1.1. Configuración de usos U1

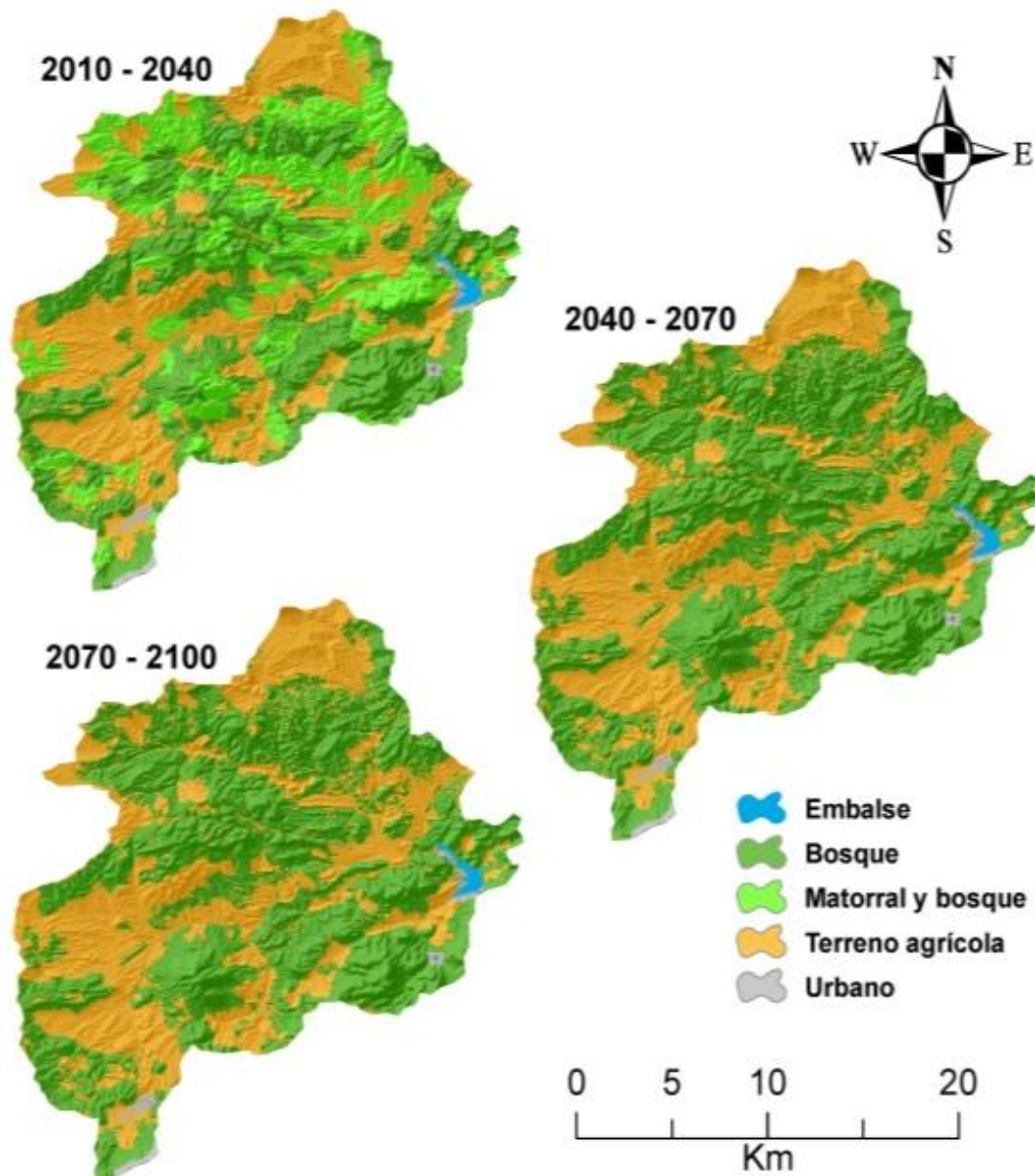


Figura 5.12: Mapas de distribución de los usos del suelo considerando la configuración de usos U1, en el que se considera un aumento del 5% del uso del suelo para finalidades agrícolas, en cada intervalo de 30 años.

En la configuración de usos U1 se ha considerado un aumento de los campos de cultivo del 5% del área total de la cuenca, en cada uno de los intervalos considerados (2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100), manteniendo las prácticas agrarias actuales en detrimento de las áreas mixtas de matorral y bosque y las áreas de matorral. El marco socio-económico que caracteriza esta configuración supone un incremento económico del sector primario ayudado por las subvenciones de la PAC.

La conversión de zonas marginales en terreno agrícola se ha considerado progresiva y en función de la pendiente, de modo que en el intervalo entre 2010 y 2040 se cultivan las áreas mixtas y de matorral con pendiente menor o igual al 3%, entre 2040 y 2070 las de pendiente menor o igual al 5% y entre 2070 y 2100 las de pendiente menor o igual al 6%.

Respecto a la parte natural restante, la falta de abandono de campos conlleva que toda la vegetación que inicialmente correspondía a la categoría mixta en el primer intervalo se transforma en bosque en los siguientes periodos. De forma similar, se asume que los usos de matorral existentes en el primer periodo temporal (2010-2040) se transforman en bosque en los siguientes periodos. Por tanto, la única categoría de uso de suelo natural (no cultivado) existente en el tercer periodo temporal (2070-2100) corresponde al bosque (Figura 5.12).

En comparación al resto de configuraciones, la configuración U1 presenta la menor cobertura de vegetación natural a final de siglo, que proporcione protección a los suelos, y la mayor proporción de suelo agrícola sin la aplicación de medidas de conservación del suelo.

5.3.1.2. *Configuración de usos U2*

La configuración de usos U2 se ha elaborado considerando que se mantiene la superficie de los campos de cultivo a lo largo de todo el periodo considerado (2010-2100), utilizando prácticas agrarias que favorecen la conservación del suelo siguiendo las recomendaciones de la PAC (EEA, 2013; European-Comision, 2013b, a). El marco socio-económico que podría enmarcar esta configuración supone un mantenimiento de la población dedicada a la agricultura, resultando rentable aplicar las directrices de la PAC. En la configuración U2 se introduce el uso del barbecho verde dentro de las categorías de usos del suelo ("Terreno agrícola BV"). Esta práctica de barbecho se caracteriza por mantener una cobertura vegetal permanente en los terrenos de cultivo a lo largo de todo el año.

Las recomendaciones de la PAC para la conservación del suelo implican un doble cultivo que se refleje como una cobertura vegetal constante en los campos de labor, que se deben adaptar estas recomendaciones a las propiedades de cada zona en particular (EEA, 2013). En la mayor parte

de los casos se trata de un barbecho sembrado con siembra de alguna planta que mejora el suelo, normalmente una leguminosa tipo veza, yeros, o la almorta. Otra alternativa sería el uso mixto de los campos utilizando los cultivos actuales en la zona, dedicando la mitad de la extensión del terreno al cultivo de árboles frutales de secano (olivos o almendros) y dedicar la otra mitad dedicada al cultivo de cereal. En este uso mixto de las labores, ambos tipos de cultivos se intercalan a distancias regulares para facilitar la cosecha del cereal, y perpendicularmente a las líneas de máximo pendiente de los campos para proteger de la erosión, aplicando así criterios de buenas prácticas agrícolas. Se ha optado por incorporar el uso mixto de cultivos como manejo preferente que satisfaga las recomendaciones de la PAC por tres motivos principales. El primero consiste en que las demás opciones de cultivos de secano (alfalfa, leguminosas de grano, etc.) son de ciclo corto que se solapa con los cultivos del cereal (Allen et al., 1998). En segundo lugar, los barbechos con leguminosa no tienen su máximo de crecimiento en otoño que es cuando se producen las precipitaciones máximas en la cuenca de estudio. Finalmente, almendros y olivos son cultivos extendidos en la zona, lo que facilita su implementación en nuevos campos.

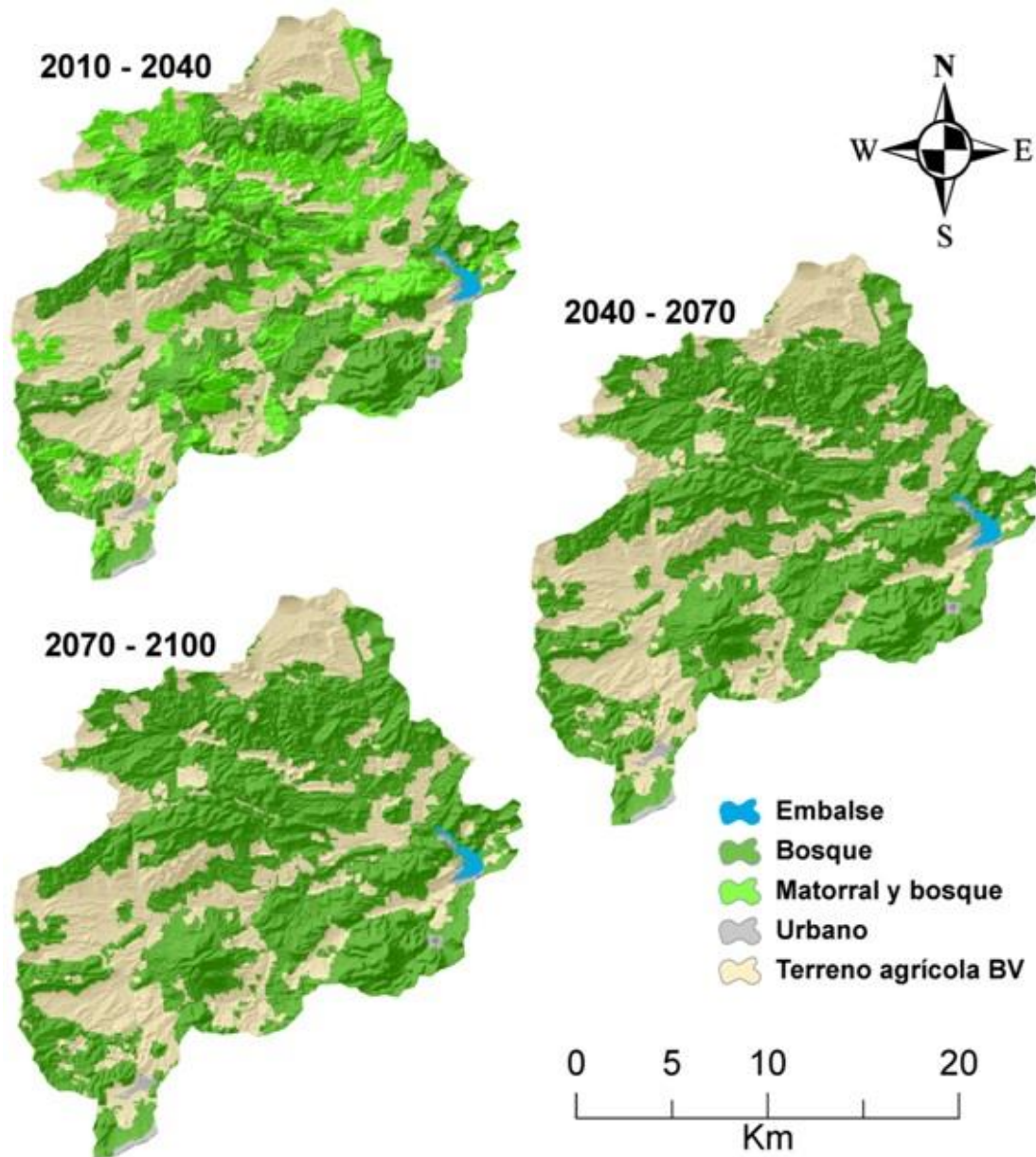


Figura 5.13: Mapas de distribución de los usos del suelo considerando la configuración de usos U2, representados en intervalos de 30 años, en los que se considera que se mantiene la extensión de usos agrícolas actuales, pero se aplican las buenas prácticas de cultivo propuestas por la PAC (European-Comision, 2013b), y se introduce vegetación permanente en las zonas de cultivos (barbecho verde).

Respecto a la parte natural, al igual que en el caso de la configuración U1, la falta de abandono de campos conlleva que toda la vegetación que inicialmente correspondía a una cubierta mixta matorral-bosque en el primer intervalo se transforma en bosque en los intervalos siguientes, y lo mismo ocurre con el matorral, por lo que en el segundo y tercer intervalo la única categoría de terreno natural existente es la de bosque (Figura 5.13).

La configuración de usos del suelo U2, corresponde a la segunda con menor cobertura de vegetación natural a final de siglo, que proporcione protección a los suelos y la segunda con mayor actividad agrícola, considerando la aplicación de las medidas de protección del suelo en terreno agrícola descritas.

5.3.1.3. Configuración de usos U3

La configuración de usos U3 se ha elaborado considerando una reducción de los campos de cultivo del 10% del área total de este uso (5% del total de la cuenca), en cada uno de los intervalos considerados (2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100), conservando las técnicas agrarias actuales. La previsión demográfica de la comarca de los Vélez elaborada por el Instituto de estadística y cartografía de la Junta de Andalucía indica una disminución progresiva de la población de hasta el 16% para el horizonte 2035 (Junta_de_Andalucía, 2012); Tabla 5.15).

	2009	2015	2020	2025	2030	2035
Habitantes	12 805	11 841	11 294	10 979	10 789	10 744
Decrecimiento	0	964	1 511	1 826	2 016	2 061
Porcentaje	0.0%	7.5%	11.8%	14.3%	15.7%	16.1%

Tabla 5.15: Previsión de la evolución poblacional de la comarca de los Vélez (que incluye Vélez-Blanco, Vélez-Rubio, María y Chirivel), desde el dato de 2009 hasta el 2035, estimada por el Instituto de estadística y cartografía de la junta de Andalucía (Junta_de_Andalucía, 2012), sobre el que se ha calculado el valor y porcentaje de decrecimiento.

El marco socio-económico que podría enmarcar esta configuración supone que solo una parte de este abandono progresivo se refleja en la extensión espacial del suelo destinado a cultivos, (10% en el primer intervalo, 2010-2040, frente a más del 16% que se prevé para 2035), cuyos agricultores conservan las técnicas tradicionales de cultivo. Los terrenos agrícolas abandonados se incluyen dentro de la nueva categoría de usos del suelo "Suelo desnudo". La conversión de terreno agrícola a terreno natural se ha considerado progresiva y en función de la pendiente, de modo que en el intervalo entre 2010 y 2040 se abandonan áreas de cultivo con pendiente mayor o igual al 16%, entre 2040 y 2070 las de pendiente mayor o igual al 12% y entre 2070 y 2100 las de pendiente mayor o igual al 10%.

Respecto a la parte natural, los terrenos que son abandonados, se transforman a la categoría "matorral" en el siguiente intervalo y siguen la misma tendencia que los usos de suelo naturales expuesta al inicio del presente capítulo, por lo que al contrario que los escenarios de usos anteriores, en el intervalo de 2070 a 2100 de la configuración U3, no todo el terreno natural corresponde a bosque (Figura 5.14).

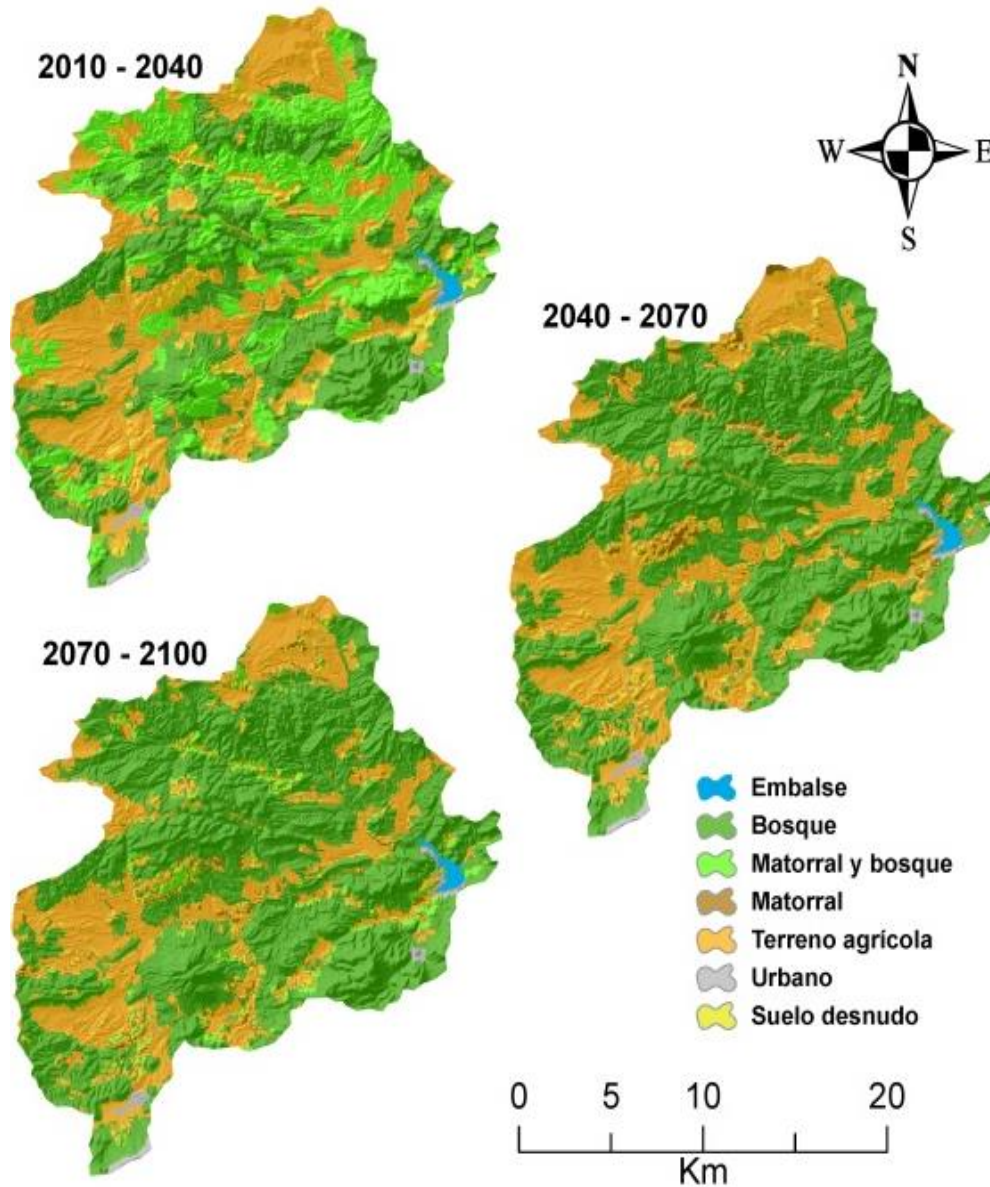


Figura 5.14: Mapas de distribución de los usos del suelo considerando la configuración de usos U3, representados en intervalos de 30 años, en los que se considera que la extensión de usos agrícolas actuales se reduce un 10% en cada intervalo. Las zonas de abandono reciente, se han considerado que pertenecen a una nueva categoría de suelo desnudo.

La configuración de usos del suelo U3, corresponde a la tercera con menor cobertura de vegetación natural a final de siglo, que proporcione protección a los suelos y el tercero con mayor actividad agrícola, aunque al contrario que las dos configuraciones anteriores, se ha introducido un abandono progresivo de las zonas agrícolas sin la aplicación de medidas de protección del suelo en los cultivos.

5.3.1.4. *Configuración de usos U4*

La configuración de usos U4 se ha elaborado considerando una reducción de los campos de cultivo del 20% del área total de este uso (10% de la cuenca), en cada uno de los intervalos considerados (2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100), conservando las técnicas agrarias actuales.

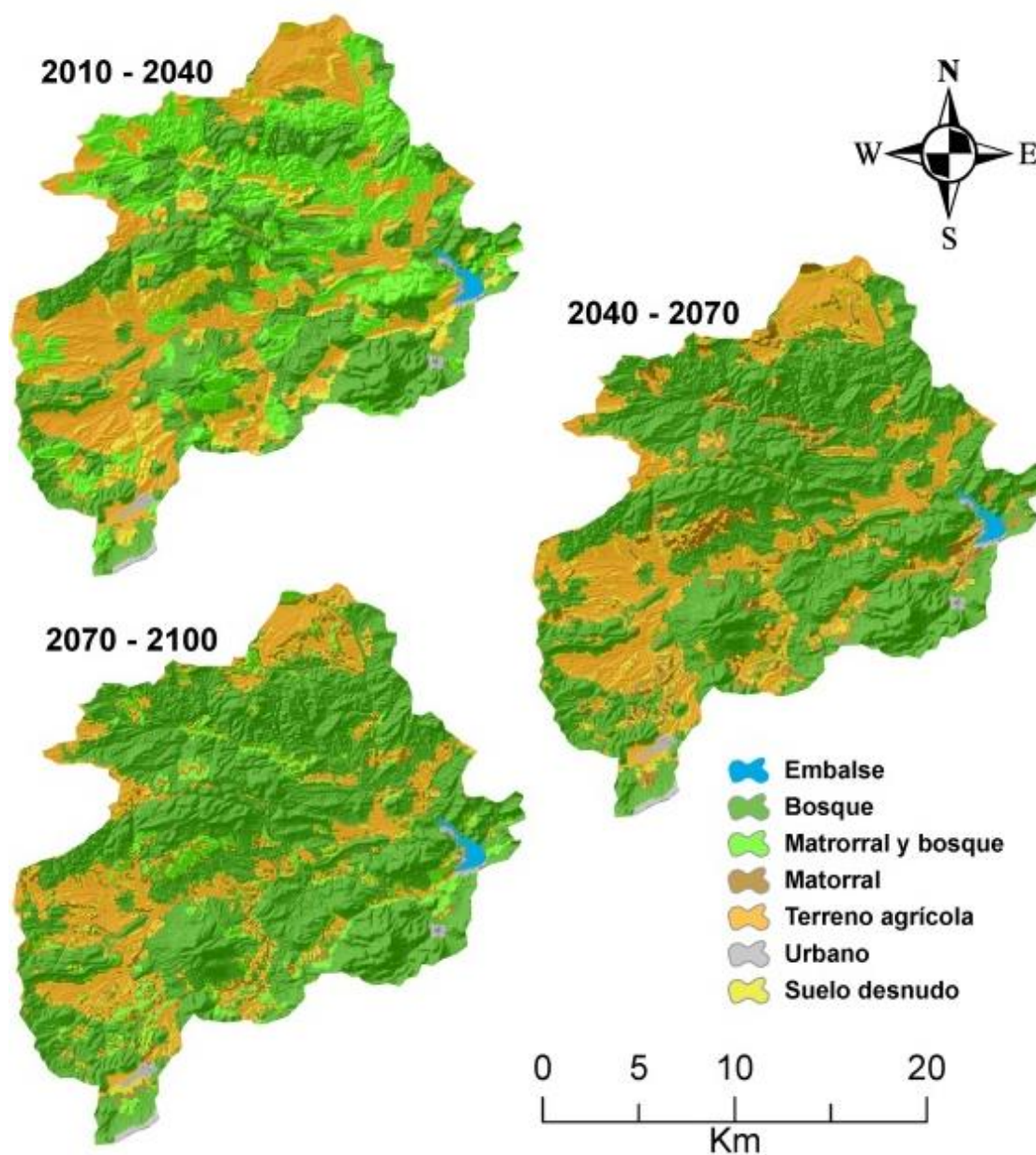


Figura 5.15: Mapas de distribución de los usos del suelo considerando la configuración de usos U4, representados en intervalos de 30 años, en los que se considera que la extensión de usos agrícolas actuales se reduce un 20% en cada intervalo.

El marco socio-económico que podría enmarcar esta configuración, supone que la pérdida de población de la zona se refleja en la pérdida de zonas de cultivo. La conversión de terreno agrícola a terreno natural se ha considerado progresiva y en función de la pendiente, de modo

que en el intervalo entre 2010 y 2040 se abandonan áreas de cultivo con pendiente mayor o igual al 12%, entre 2040 y 2070 las de pendiente mayor o igual al 8% y entre 2070 y 2100 las de pendiente mayor o igual al 6%. Los terrenos que son abandonados siguen las mismas tendencias de recuperación de la vegetación natural (matorral y bosque) que en la configuración de usos U3 (Figura 5.14).

La configuración de usos del suelo U4, corresponde a la segunda con mayor cobertura de vegetación natural a final de siglo, y a la segunda con menor actividad agrícola. Al igual que en la configuración anterior, se considera un abandono progresivo de las zonas agrícolas, y al igual que U1 y U3, no se considera la aplicación de medidas de protección del suelo en los cultivos.

5.3.1.5. Configuración de usos U5

La configuración de usos U5 se ha elaborado considerando una reducción de los campos de cultivo del 30% del área total de este uso (15% de la cuenca), en cada uno de los intervalos considerados (2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100), conservando las técnicas agrarias actuales. La conversión de terreno agrícola a terreno natural se ha considerado progresiva y en función de la pendiente, de modo que en el intervalo entre 2010 y 2040 se abandonan áreas de cultivo con pendiente mayor o igual al 10%, entre 2040 y 2070 las de pendiente mayor o igual al 6% y entre 2070 y 2100 las de pendiente mayor o igual al 3%. Respecto a la parte natural, los terrenos que son abandonados, siguen las mismas tendencias que en las configuraciones de usos U3 y U4 (Figura 5.14).

La configuración de usos del suelo U5, corresponde a la de mayor cobertura de vegetación natural a final de siglo, y a la de menor actividad agrícola. Al igual que las dos configuraciones anteriores, se considera un abandono progresivo de las zonas agrícolas, y al igual que U1, U3 y U4, no se considera la aplicación de medidas de protección del suelo en los cultivos.

En resumen, comparando las configuraciones de suelo consideradas con la configuración de usos inicial del mapa CORINE *Land Cover* de 2006 (EEA, 2006), se observa que existe una evolución de los espacios naturales más maduros, en todos los escenarios de usos respecto a la configuración inicial, desde el primer intervalo al último y de la primera a la última configuración (Figura 5.17).

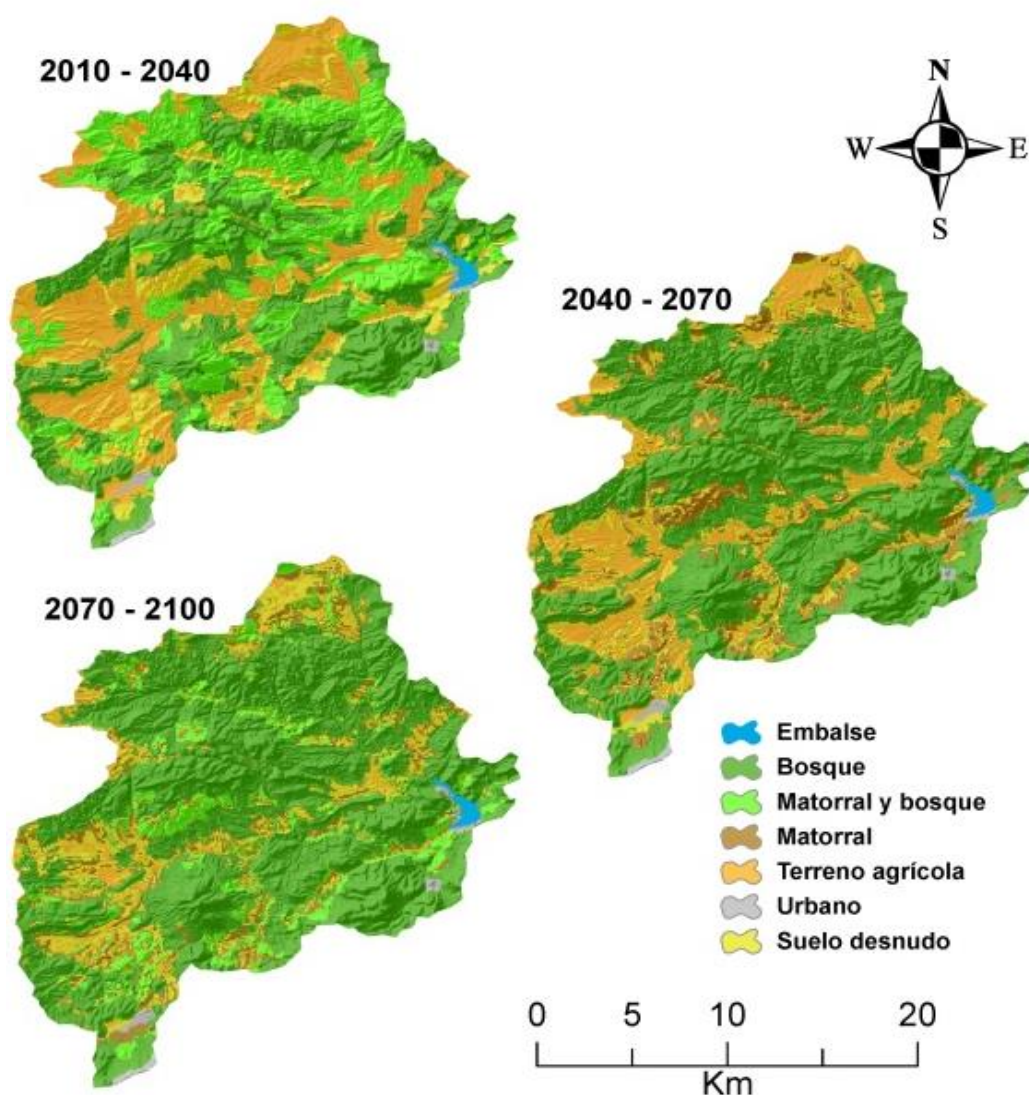


Figura 5.16: Mapas de distribución de los usos del suelo considerando la configuración de usos U5, representados en intervalos de 30 años, en los que se considera que la extensión de usos agrícolas actuales se reduce un 30% en cada intervalo.

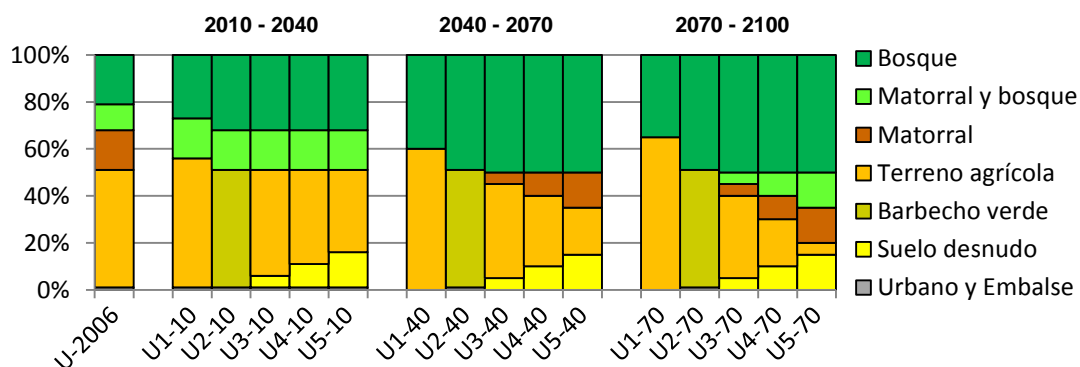


Figura 5.17: Comparativa entre los últimos usos del suelo mapeados en el periodo instrumental (U-2006; CORINE Land Cover 2006, (EEA, 1995) y los porcentajes de cada tipo de suelo utilizado en cada uno de las distintas configuraciones de usos (U1, U2, etc.) separados en bloques de treinta años, siguiendo los tres intervalos de simulación.

Las configuraciones de usos del suelo planteados suponen un conjunto de condiciones muy extremas y homogéneas en la cuenca, que difícilmente se van a producir en la realidad. Sin embargo, al tratarse de casos extremos existe una alta probabilidad de que los resultados de la respuesta hidrológica y de transporte de sedimentos en la cuenca se encuentre en el intervalo que delimitan, cualquiera que sea su evolución de la configuración de usos.

5.3.2. Evolución de la hidrología y el transporte de sedimentos en la cuenca de Valdeinfierno a lo largo del siglo XXI.

En este apartado se aborda la modelización hidrológica-sedimentaria con el modelo TETIS-SED combinando las proyecciones de cambio climático con las configuraciones de usos del suelo descritas anteriormente. La respuesta hidrológica-sedimentaria para los tres escenarios de cambio climático (B1, A1B, A2) y los cambios en los usos del suelo descritos se han dividido en resultados hidrológicos y de producción de sedimento (Tabla 5.16; Figura 5.18). En la Figura 5.18, se representan las proyecciones de los volúmenes de agua y la producción de sedimentos a lo largo del siglo XXI, que resultan de aplicar las series climáticas de los diferentes GCMs en las cinco configuraciones de usos de suelo. En la proyección de la hidrología, se observa como durante el primer periodo de modelización existe una ordenación de las curvas de acuerdo al momento de producción del evento máximo, y en menor medida una gradación en relación a la configuración del suelo. Esta ordenación se pierde en periodos temporales sucesivos, de tal forma que las curvas se entrelazan durante el último periodo modelado. Esta disposición de las curvas indica que los usos de suelo pueden afectar a la respuesta hidrológica a corto-medio plazo, pero que a largo plazo no son tan determinantes en la hidrología.

En el caso de la producción de sedimentos (Figura 5.18) se observa que hasta mitad de siglo existe una gradación de las curvas en relación al momento de ocurrencia del evento extraordinario, pero con posterioridad la ordenación de las curvas de menor a mayor sedimento producido depende fundamentalmente del tipo de uso de suelo. En nuestro caso, los usos U5 y U4 proporcionan el menor volumen de sedimento, y los U1 y U3 generan la mayor producción total de sedimento. Observando los resultados numéricos de la Tabla 5.16, también se puede identificar esta tendencia en la erosión, puesto que en todos los escenarios de cambio climático el valor máximo de producción de sedimento siempre se produce en la configuración de suelos U1, y el mínimo en la configuración de suelos U5.

En la Figura 5.18, también se puede observar que existen diferencias importantes en el rango de dispersión de los resultados, puesto que las curvas de caudal acumulado se encuentran mucho más próximas entre ellas que las de sedimento acumulado. Esta observación se puede constatar numéricamente en la Tabla 5.16 en donde la diferencia (proporcional) entre el valor máximo y mínimo de los parámetros en las distintas configuraciones, es mayor para la sedimentología (entre el 70 y el 85%) que para la hidrología (entre el 20 y el 40%).

Escenario	Usos	Modelo	Hidrología			Sedimento Transportado			
			Q max (m³/s 24h)	Vol. Acum. (Hm³)	Media anual (Hm³)	Q max (m³/s 24h)	Vol. Acum. (Hm³)	Erosión anual (t/Ha)	Media anual (Hm³)
B1	U1	01. BCCM1 (10)	159.332	81.076	0.811	42.752	12.975	3.115	0.13
		13. GIER (10)	172.862	104.707	1.047	49.809	16.139	3.875	0.161
		22. NCCCSM (40)	165.303	89.649	0.896	45.028	14.121	3.39	0.141
	U2	01. BCCM1 (10)	130.872	70.698	0.707	19.487	7.578	1.82	0.076
		13. GIER (10)	143.488	80.349	0.803	23.318	8.591	2.063	0.086
		22. NCCCSM (40)	132.105	73.717	0.737	18.782	7.706	1.85	0.077
	U3	01. BCCM1 (10)	157.483	78.47	0.785	34.388	9.09	2.182	0.091
		13. GIER (10)	170.766	99.235	0.992	39.815	11.036	2.65	0.11
		22. NCCCSM (40)	155.573	84.979	0.85	25.468	8.627	2.071	0.086
	U4	01. BCCM1 (10)	157.512	77.576	0.776	29.282	7.063	1.696	0.071
		13. GIER (10)	170.796	97.139	0.971	33.837	8.514	2.044	0.085
		22. NCCCSM (40)	151.375	83.091	0.831	17.583	6.156	1.478	0.062
	U5	01. BCCM1 (10)	157.534	76.926	0.769	26.331	6.054	1.454	0.061
		13. GIER (10)	170.819	95.641	0.956	30.375	7.251	1.741	0.073
		22. NCCCSM (40)	148.014	81.675	0.817	13.641	4.973	1.194	0.05
A1B	U1	09. GFCM20 (10)	165.581	121.445	1.214	46.181	20.452	4.91	0.205
		09. GFCM20 (70)	165.073	101.992	1.02	44.062	15.659	3.76	0.157
		11. GIAOM (10)	162.248	83.607	0.836	43.497	13.264	3.185	0.133
		11. GIAOM (40)	160.979	83.328	0.833	41.448	13.03	3.128	0.13
		15. HADGEM (70)	162.893	91.333	0.913	42.649	13.993	3.36	0.14
	U2	09. GFCM20 (10)	135.532	102.166	1.022	20.716	11.014	2.644	0.11
		09. GFCM20 (70)	130.965	85.943	0.859	18.169	8.88	2.132	0.089
		11. GIAOM (10)	133.907	73.437	0.734	20.066	7.784	1.869	0.078
		11. GIAOM (40)	130.614	73.007	0.73	18.11	7.578	1.819	0.076
		15. HADGEM (70)	130.124	74.666	0.747	17.971	7.698	1.848	0.077
	U3	09. GFCM20 (10)	163.569	116.067	1.161	37.015	12.721	3.054	0.127
		9. GFCM20 (70)	149.712	96.818	0.968	19.216	8.96	2.151	0.09
		11. GIAOM (10)	160.416	81.055	0.811	34.945	9.35	2.245	0.094
		11. GIAOM (40)	152.593	80.107	0.801	23.854	8.109	1.947	0.081
		15. HADGEM (70)	148.378	86.033	0.86	19.57	8.168	1.961	0.082
	U4	09. GFCM20 (10)	163.599	113.964	1.14	31.476	9.331	2.24	0.093
		9. GFCM20 (70)	141.847	94.698	0.947	9.619	5.865	1.408	0.059
		11. GIAOM (10)	160.445	80.19	0.802	29.769	7.233	1.737	0.072
		11. GIAOM (40)	149.015	78.865	0.789	16.663	5.852	1.405	0.059
		15. HADGEM (70)	140.929	83.805	0.838	11.828	5.676	1.363	0.057
	U5	09. GFCM20 (10)	163.623	112.474	1.125	28.279	7.822	1.878	0.078
		9. GFCM20 (70)	136.431	93.195	0.932	7.696	5.01	1.203	0.05
		11. GIAOM (10)	160.468	79.567	0.796	26.786	6.205	1.49	0.062
		11. GIAOM (40)	146.128	77.934	0.779	13.091	4.769	1.145	0.048
		15. HADGEM (70)	135.799	82.193	0.822	9.017	4.611	1.107	0.046
A2	U1	09. GFCM20 (40)	166.949	89.106	0.891	45.751	14.144	3.396	0.141
		13. GIER (10)	175.11	107.288	1.073	50.869	16.384	3.934	0.164
		13. GIER (40)	170.559	107.354	1.074	47.745	16.092	3.864	0.161
	U2	21. MRCGCM (70)	160.277	85.162	0.852	41.489	13.26	3.184	0.133
		09. GFCM20 (40)	133.463	73.888	0.739	19.109	7.744	1.859	0.077
		13. GIER (10)	146.939	80.843	0.808	24.633	8.708	2.091	0.087
	U3	13. GIER (40)	137.297	80.015	0.8	20.39	8.311	1.995	0.083
		21. MRCGCM (70)	128.239	71.599	0.716	17.577	7.466	1.793	0.075
		09. GFCM20 (40)	157.082	84.776	0.848	26.541	8.796	2.112	0.088
	U4	13. GIER (10)	172.984	101.904	1.019	40.624	11.324	2.719	0.113
		13. GIER (40)	160.261	101.004	1.01	27.556	9.959	2.391	0.1
		21. MRCGCM (70)	146.17	80.637	0.806	19.102	7.772	1.866	0.078
	U5	09. GFCM20 (40)	152.836	83.081	0.831	17.825	6.208	1.49	0.062
		13. GIER (10)	173.011	100.009	1	34.505	8.731	2.096	0.087
		13. GIER (40)	155.826	98.57	0.986	18.511	7.043	1.691	0.07
	U5	21. MRCGCM (70)	138.911	78.732	0.787	11.606	5.405	1.298	0.054
		09. GFCM20 (40)	149.443	81.804	0.818	13.822	5.024	1.206	0.05
		13. GIER (10)	173.033	98.611	0.986	30.966	7.447	1.788	0.074
		13. GIER (40)	152.287	89.857	0.899	14.307	5.69	1.366	0.057
		21. MRCGCM (70)	133.903	77.356	0.774	8.89	4.397	1.056	0.044

Tabla 5.16: Valores de hidrología y sedimentología de caudal máximo, volumen acumulado en el embalse, media de aporte anual al embalse de Valdeinfierno y erosión media anual, en previsión de los próximos 100 años, para cada uno de las configuraciones de usos del suelo consideradas, aplicadas sobre los GCM seleccionados, determinados sobre los escenarios SRES del AR4. En negrita y sombreado gris, se subrayan los valores máximos y mínimos respectivamente, en cada escenario, de cada uno de los parámetros.

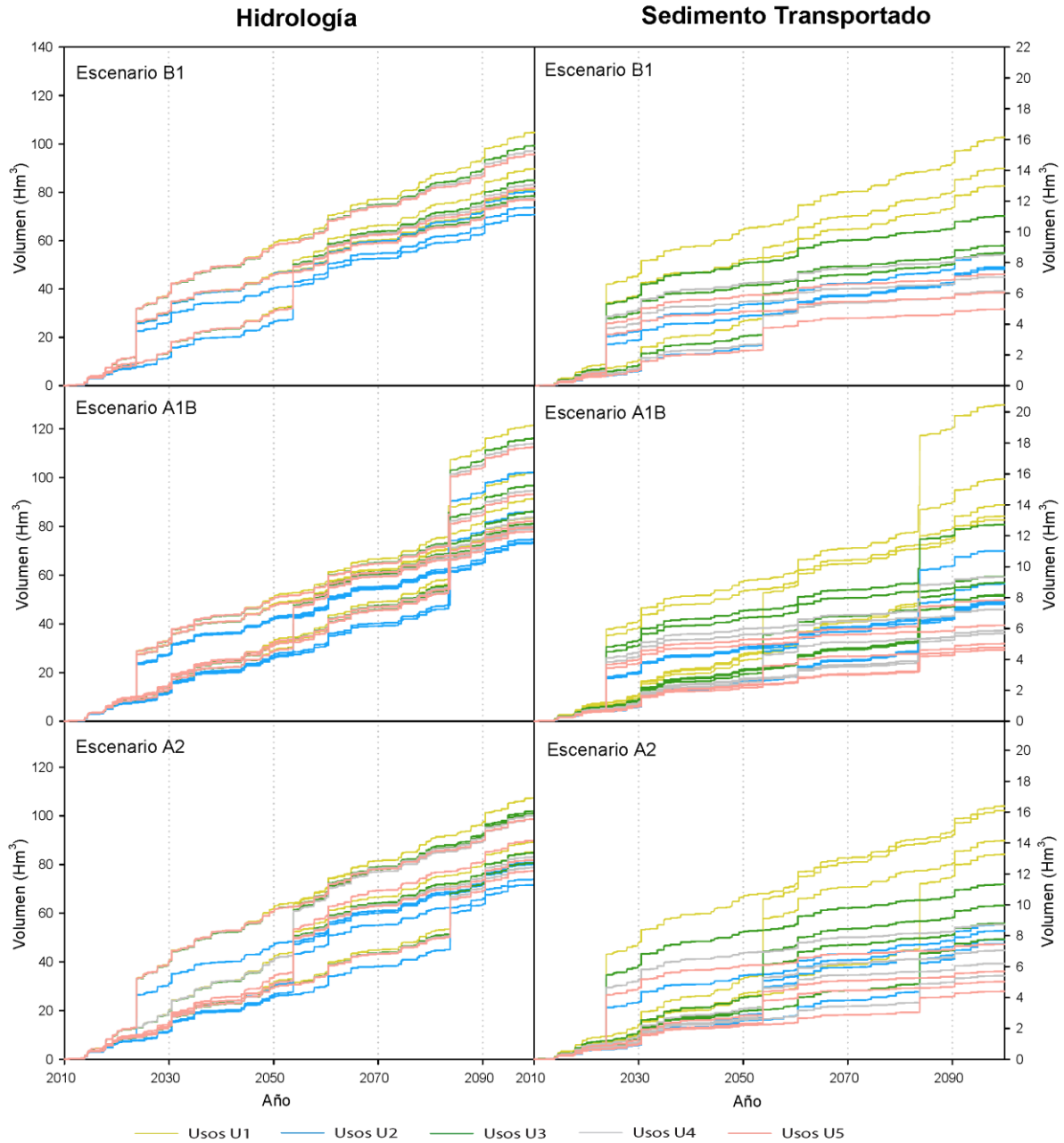


Figura 5.18: Previsión del volumen de agua y de producción de sedimentos en la cuenca del embalse de Valdeinfierno a lo largo del siglo XXI, considerando las distintas configuraciones de usos del suelo desarrolladas aplicadas sobre los GCM seleccionados como los de máxima mínima y media erosión en cada uno de los escenarios SRES considerados en el AR4.

Con el fin de poder comparar los resultados de las aportaciones hidrológicas y de sedimento para las diferentes configuraciones de usos del suelo en los escenarios de cambio climático, independientemente del modelo de circulación, se ha calculado para cada combinación de ambos elementos la media de los resultados de todos los GCMs (Figura 5.19).

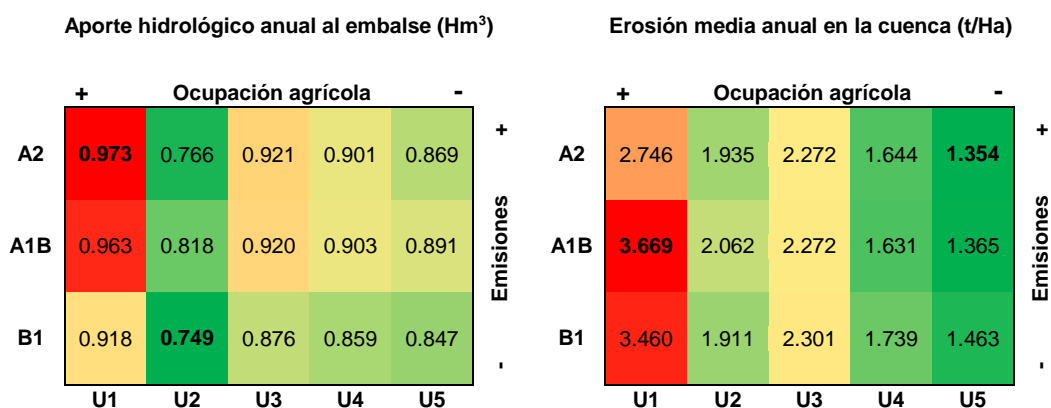


Figura 5.19: Aportación media anual de la escorrentía (izquierda) y erosión media anual (derecha), combinando todos los modelos de circulación climática para los escenarios de emisión de los SRES del AR4, y las cinco configuraciones de uso del suelo. En la parte superior se indica la proporción relativa de terreno ocupado por la agricultura en la cuenca, según la configuración de los usos del suelo. En tonos rojos y naranjas se resaltan las aportaciones anuales más altas, en tonalidades verdes las aportaciones más bajas, y en tonalidades amarillas las aportaciones intermedias.

En la Figura 5.19 se observa que en el caso del aporte hidrológico no existe una gradación nítida en relación al uso del suelo, con excepción del U1 y U2 que contrastan claramente. De hecho, se evidencia un mayor control por parte de los escenarios SRES, y por tanto, de los forzamientos climáticos. Los aportes hidrológicos son mayores para el escenario A2 que en el escenario B1 para cada uno de los usos de suelo. En el caso de la erosión media anual, se evidencia un control claro de los tipos de uso de suelo con tendencia a disminuir desde el tipo U1 al U5 y, en menor medida desde el escenario B1 al A2. Estos resultados constatan la influencia de los tipos de uso de suelos en la erosión a corto, medio y largo plazo.

La diferencia de comportamiento entre la hidrología y el transporte de sedimentos frente a las distintas configuraciones de usos del suelo se refleja igualmente en los valores máximos y mínimos estimados. En la Tabla 5.16, Figura 5.18 y la Figura 5.19 se observa que mientras que la configuración de suelos que produce las aportaciones mínimas de caudal de agua corresponde al escenario U2, en el caso del volumen de sedimentos las tasas menores de erosión anual se producen para la configuración de usos U5.

La Tabla 5.16 permite definir numéricamente el comportamiento general de cada escenario de cambio climático en función de cada una de las configuraciones de usos del suelo, el modelo de circulación global (GCM) utilizado, y el intervalo en el que se produce el evento hidrológico extraordinario. De esta forma se observa que todos los picos hidrológicos mayores, y la mayoría de los casos con tasas de erosión máxima, se producen en los GCMs en los que el evento máximo se encuentra en el primer intervalo (2010-2040). Igualmente, la mayoría de los modelos que presentan el menor pico hidrológico y menor tasa de transporte de sedimento se producen en los que el evento máximo se encuentra en el último intervalo (2070-2100), independientemente de la configuración de los usos del suelo. El escenario climático B1 es una excepción, puesto que ninguno de los GCMs considerados contiene un evento máximo en el último intervalo.

En la respuesta ante la erosión, se obtienen tasas similares en los suelos desnudos y en los cultivos tradicionales, a pesar de que el segundo tipo presenta una cobertera que protege el suelo durante una parte importante del año. Esta similitud en el comportamiento frente a la erosión se debe a que las mayores precipitaciones (intensidad y volumen) se producen en otoño, cuando no hay cobertera vegetal en los cultivos (Figura 5.11), y por tanto, el comportamiento del terreno de cultivo se asimila a un suelo desnudo. Esta característica se constata en la configuración U1 con la mayor extensión de uso agrícola y que genera la mayor producción de sedimento en todos los periodos, modelos climáticos y escenarios, mientras que esta decrece en las configuraciones donde se introduce el abandono agrícola (U3,U4,U5).

Comparando los resultados obtenidos con la aplicación de las distintas configuraciones de usos del suelo respecto a los resultados de la configuración de suelos actual, se observa que con la excepción del escenario climático A1B con configuración de suelo U1, todos los valores de las variables hidrológicas y de transporte de sedimentos son mayores considerando los usos actuales a lo largo de todo el periodo de simulación. Este resultado indica que, partiendo de la situación actual de la cuenca, cualquier línea de evolución que favorezca el abandono y el progresivo restablecimiento de los ecosistemas naturales de matorral y bosque reducirá la producción de sedimento.

Por otro lado, comparando los resultados de la Tabla 5.16 y la Figura 5.19, con los datos del periodo instrumental (capítulo 4), se observa que para todos los escenarios y todas las configuraciones de usos planteados (distintos a la distribución de usos actual), la erosión anual en las diferentes proyecciones (entre 1.056 y 4.91 t/Ha) es mucho menor que la del periodo instrumental (8.36 t/Ha). Esta reducción también se observa en el volumen de agua generado anualmente (entre 0.847 y 0.973 frente a 1.782 Hm³/año), y los caudales diarios máximos tanto de agua como de sedimentos (entre 128.24 y 175.11 frente a 179.96 m³/s, y entre 7.70 y 50.87 frente a 75.95 m³/s, respectivamente). Este resultado muestra que independientemente de la configuración de usos del suelo considerada, la evolución de las áreas de vegetación natural, sumada a la tendencia de los modelos de cambio climático a aumentar la importancia de los picos de poca y media magnitud, reduce la influencia de los eventos máximos. Dado que estos eventos son los más determinantes en la dinámica hidrológica de la cuenca, tanto los aportes hídricos como de sedimentos también se ven reducidos.

5.3.3. Discusión sobre la evolución hidrológica y de transporte de sedimentos de la cuenca de Valdeinfierno a lo largo del siglo XXI.

La comparación de los distintos escenarios de cambio climático, considerando un amplio rango de modelos de circulación atmosférica, junto con diversos supuestos de cambio de uso del suelo y ocurrencia de un evento extraordinario de periodo de retorno de 100 años, ha permitido

analizar el comportamiento general de la cuenca de estudio y la influencia de los forzamientos climáticos y de cambio ambiental sobre su hidrología y erosión.

Respecto a los escenarios de cambio climático, se ha determinado que un aumento de las emisiones (B1-A1B-A2) se traduce en una reducción en número y un aumento en magnitud de los eventos de precipitación intensa, de acuerdo con los resultados expuestos por Christensen et al. (2007) para el Mediterráneo occidental. En la cuenca de estudio, los modelos indican que cambios en la precipitación se producen en los eventos pequeños e intermedios, mientras que en los eventos grandes la intensidad se reduce respecto a los del periodo instrumental. A nivel hidrológico, estos efectos sobre la precipitación se traducen en un aumento de la escorrentía pese a la disminución de eventos extremos. Otros parámetros hidrológicos asociados al aumento de la temperatura como son la humedad del suelo y la producción de biomasa, se han tenido en cuenta en el cálculo de la evapotranspiración potencial. Sin embargo, no se han tenido en cuenta sus implicaciones en las características del suelo y la vegetación. En el caso de la producción de sedimento a largo plazo, se obtiene una tendencia similar a la de la hidrología. Los modelos climáticos regionales prevén un cierto incremento de la magnitud en las lluvias medias (principalmente en invierno; Gibelin y Deque, 2003; Garcia et al., 2007) pero una reducción de la precipitación anual (menos eventos), al igual que en otros estudios en cuencas mediterráneas (Clarke y Rendell, 2010). En esta Tesis Doctoral se ha demostrado la sensibilidad que presenta la cuenca alta del Guadentín a las precipitaciones extremas y los picos de caudal, y que los eventos de lluvia extrema puede generar más del 50% de la producción de sedimento que llega al embalse de Valdeinfierno (ver capítulo 4). La reducción de magnitud de este tipo de eventos, de acuerdo a los resultados del *downscaling* climático, se refleja en una menor tasa anual de erosión simulada respecto a las obtenidas para el periodo instrumental (entre 3.9 y 5.14 frente a 8.36 t/Ha). Esta importante diferencia en las tasas está asociada a la reducción de las lluvias extremas proyectadas, en parte condicionada por la dificultad de los modelos de circulación atmosférica para simular los eventos extremos (probabilidad de excedencia menor del 1%). La erosión y el transporte de sedimentos son mayores cuando el evento máximo se produce en el primer intervalo de simulación (periodo 2010-2040), donde se presentan la menor extensión de la cobertura con vegetación natural (bosque y matorral). Por ello, se puede afirmar que la introducción de diferentes configuraciones de los usos del suelo tiene un papel relevante en la hidrología y el transporte de sedimentos, obteniéndose menores tasas de erosión y de escorrentía en aquellas configuraciones con un estado de evolución de los ecosistemas naturales más avanzado (Boardman y Favis-Mortlock, 1998a, b). En el caso de las zonas cultivadas, las prácticas del barbecho verde o cultivos que mantengan la protección del suelo a lo largo del periodo de lluvias resultan determinantes para una menor erosión en cuenca, corroborando los resultados obtenidos en diversos estudios experimentales (Boellstorff y Benito, 2005; Garcia-Ruiz y Lana-Renault, 2011). Estas prácticas de protección del suelo resultan especialmente importantes en ambientes frágiles o fácilmente erosivos como la cuenca alta del Guadentín (Puigdefabregas et al., 1999). En este sentido, resulta efectivo que las políticas agrarias favorezcan estas prácticas de cultivo y de conservación orientadas a la protección de los suelos, y la sostenibilidad ambiental y socio-

económica de las regiones (Perez, 1990; Boellstorff y Benito, 2005). Igualmente, resulta significativa la reducción de la escorrentía y la producción de suelos paralela al aumento de las zonas con vegetación natural tanto de tipo mixto (matorral y bosque) como de bosque (ej. Configuraciones U4 y U5). En estas zonas, la vegetación de tipo matorral intercepta entre un 21 y 65% de la lluvia (Domingo et al., 1998; Belmonte Serrato et al., 1999), y la vegetación arbórea entre un 7 y un 70% (Llorens et al., 1997; Llorens y Domingo, 2007), dependiendo de la intensidad de precipitación, la pendiente del terreno y la densidad de vegetación. En su conjunto, la tendencia futura de los usos del suelo constituye la variable más determinante en la producción de sedimentos, puesto que las tasas máximas y mínimas se obtienen siempre en las mismas configuraciones de usos, independientemente del escenario climático y el periodo de ocurrencia del evento máximo. Esta conclusión pone de manifiesto la alta dependencia de las proyecciones de erosión en los escenarios de cubierta del suelo (IPCC, 2014). Teniendo en cuenta que las políticas de gestión tiene que estar adecuadas al sostenimiento socio-económico y ambiental de las zonas rurales (European-Comision, 2012b, a), se puede afirmar que la configuración de suelos U2, pese a no representar las menores tasas de erosión, es la más sostenible de las planteadas. Esta configuración U2 muestra un excelente balance de aprovechamiento económico (agrícola) y de cubierta natural, manteniendo la producción de sedimento en valores razonables (entre 2.6 y 1.8 t/Ha*año).

5.4. Conclusiones

La determinación de series sintéticas de precipitación y temperatura dependientes de las características de una cuenca y de la climatología permiten plantear escenarios de modificación del clima, con la garantía de que las variables meteorológicas sobre las que se aplican dichas modificaciones son representativas de las tendencias de los fenómenos naturales sobre estas series sintéticas dependientes del clima, se puede aplicar distintos escenarios de cambio y evolución climática, como los propuestos por el IPCC.

Los resultados obtenidos de las simulaciones indican que las series meteorológicas generadas mediante las variables de reanálisis minimizan los valores máximos de precipitación registrados en las estaciones instrumentales, por lo que los resultados de las proyecciones futuras de volumen total y picos de los caudales líquidos y sólidos constituyen una aproximación conservadora de las tendencias esperables en la cuenca de estudio.

Las simulaciones hidrometeorológicas futuras basadas en el *downscaling* estadístico y las anomalías de los distintos GCMs muestran que en ausencia de picos extremos, los caudales y el transporte de sedimentos determinados por los eventos de baja y media magnitud, tienden a aumentar a lo largo del siglo XXI, mientras que en presencia de picos extremos estas tendencias se invierten

Un aumento de las emisiones (B1-A1B-A2) se traduce en una reducción en número y un aumento en magnitud de los eventos de precipitación bajos e intermedios, y una disminución en la magnitud de los eventos extremos que son los más determinantes en la hidrología y el transporte de sedimentos en la cuenca.

Los modelos GCMs aplicados al escenario de emisiones intermedio A1B muestran una respuesta no lineal en relación con los SRES B1 y A2, por lo que los impactos sobre la hidrología en relación a este escenario A1B son menos previsibles.

La tendencia futura de la hidrología y el transporte de sedimentos en la cuenca de estudio indica aumento relativo en la erosión de la cuenca, proporcional a las emisiones de gases de efecto invernadero (comparando los parámetros entre escenarios), más marcado en cuanto mayor es el incremento de la temperatura.

La introducción de diferentes configuraciones de los usos del suelo tiene un papel relevante en la hidrología y el transporte de sedimentos, obteniéndose menores tasas de erosión y de escorrentía en aquellas configuraciones con mayor proporción de bosque en la cobertura vegetal natural del suelo.

La tendencia futura de los usos del suelo constituye la variable más determinante en la producción de sedimentos, independientemente del escenario climático y el periodo de ocurrencia del evento máximo.

En la cuenca de Valdeinfierno la configuración de suelos U2, que considera la conservación de la extensión de cultivos actuales utilizando técnicas de cultivos con barbecho verde en los campos, es la más sostenible de las planteadas ya que pese a no representar las menores tasas de erosión, muestra un excelente balance de aprovechamiento económico (agrícola) y de cubierta natural que mantiene la erosión y la producción de sedimento en un rango de valores razonables.

Capítulo 6: Hidrología y producción de sedimentos en la cuenca de Valdeinfierno en los siglos XIX y XX

Introducción

El comportamiento de la hidrología en una cuenca varía sensiblemente a escala decenal y centenaria (Diodato et al., 2008). En capítulos anteriores se ha determinado como los cambios en los usos del suelo y las variaciones climáticas se traducen en cambios en la hidrología de la cuenca de estudio. Dichos cambios dependen de variables con una alta incertidumbre, entre las que destaca la actividad humana, muy condicionante y no siempre reproducible mediante los modelos hidrológicos (Barriendos y Rodrigo, 2006; Lique et al., 2009).

Los fenómenos de precipitación y escorrentía extrema tienen efectos importantes sobre la población, por este motivo, las grandes inundaciones quedan registradas en los archivos documentales, pudiendo ser reconstruidas con una buena precisión (Benito et al., 2004b; Barriendos y Rodrigo, 2006). El impacto de algunos de estos eventos es tan elevado que incluso hay constancia documental de la precipitación que los ha generado (Cohn y Stedinger, 1987; Muñoz Bravo, 1989).

Otro tipo de registros son los paleohidrológicos. según Baker et al. (1983), las evidencias paleohidrológicas consisten en una serie de indicadores producidos por la canalización del flujo durante una avenida, a partir de los cuales puede inferirse el nivel de agua o ‘paleoestado’. Los indicadores pueden reflejar la elevación de la inundación mediante marcas de erosión o pueden indicar la altura mínima que alcanzó el agua durante el caudal punta, mediante depósitos de limos y arenas. Estos depósitos de inundación de baja energía o *slackwater deposits* son los formados por materiales finos (limos y arenas) arrastrados por la avenida, que se sedimentan como consecuencia de la disminución de la velocidad del agua en zonas de estancamiento. Estos depósitos permiten la obtención de un registro más completo sobre las inundaciones pasadas aportando una valiosa información cuantitativa sobre los eventos extremos. (Guo y Cunnane, 1991; Benito et al., 2004a; Benito et al., 2010).

Los registros históricos y las series instrumentales de variables atmosféricas en distintas estaciones a nivel global permiten la elaboración de reconstrucciones de series climáticas de variables sinópticas en base a dichos datos, asimiladas a mecanismos de circulación actuales (series de reanálisis) (Uppala et al., 2005).

Las series de reanálisis permiten una buena reconstrucción de la climatología pasada a escala mensual, diaria e incluso a escalas horarias, mostrando una buena correlación con la mayor parte de las medidas de referencia a nivel mundial (Hertig et al., 2010; Nuissier et al., 2011). No obstante, estas aproximaciones no son tan precisas como en zonas de influencia oceánica, principalmente en lo referente a la precipitación (Jacob et al., 2007; Kioutsioukis et al., 2008; Segui et al., 2010), y sus resultados deben ser contrastados con datos y modelos regionales.

En el presente capítulo, se han utilizado todas las fuentes de información disponibles (reanálisis, datos históricos, registros paleohidrológicos e información meteorológica y climática regional)

para la reconstrucción del comportamiento climático en la cuenca de estudio y la respuesta hidrológica de esta a lo largo de periodos en los cuales no se dispone de registro instrumental.

Los objetivos concretos de este capítulo son:

- Reconstruir la distribución de los usos del suelo a lo largo de la primera mitad del siglo XX
- Determinar las series de variables meteorológicas y climáticas ligadas a los eventos más extremos producidos en la cuenca de Valdeinfierno a lo largo de la segunda mitad del siglo XIX y primera del siglo XX.
- Realizar simulaciones cuantitativas de la hidrología y el transporte de sedimentos en la cuenca, coherentes con los datos y observaciones históricas, a lo largo de la segunda mitad del siglo XIX y primera del siglo XX.
- Discutir la evolución de la hidrología y el transporte de sedimentos en la cuenca de Valdeinfierno entre la segunda mitad del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX.

6.1. Cambios de uso del suelo y gestión del territorio en los siglos XIX y XX

La cartografía de los usos del suelo históricos, requiere la reconstrucción de la distribución espacial de usos y vegetación en la época que se pretende simular con la mayor precisión posible. Con este objetivo se han localizado y definido mapas e indicios históricos que aportan información sobre la ocupación del terreno en la cuenca de Valdeinfierno en periodos anteriores o a lo largo del siglo XX.

En el capítulo 4 se ha indicado que los efectos de la avenida excepcional de Santa Teresa de 1879, produjeron una concienciación a nivel institucional de la importancia de la implementación de medidas para paliar los efectos de las grandes avenidas (Anonymous, 1891b; Madariaga, 1898; Codorníu, 1906). Las medidas propuestas, se centraron principalmente en la repoblación forestal de las laderas en la parte alta de la cuenca (Martínez Artero, 2001), cuya deforestación debida a la explotación maderera a finales del siglo XIX era crítica (Anonymous, 1891a). Dicha deforestación cubría prácticamente la totalidad de los antiguos bosques de María y los Vélez, (deforestación de unas 23000 Ha, 34.5% de la extensión total de ambos municipios). La aplicación de las recomendaciones y los esfuerzos económicos para implementar las obras de corrección y reforestación propuestas a principios de siglo XX en la cuenca del río Alcaide (Montiel Pinilla, 1955; Calvo García-Tornel, 1969), no fueron suficientes para mitigar el problema, que persistió en la zona de estudio, principalmente debido a que se mantuvo la tala indiscriminada en áreas de mayor extensión en las cercanías de la Rambla Mayor. Concretamente, hasta 1948 la Comisión de Repoblación del Segura (creada en 1888) no había cubierto sus objetivos iniciales, en materia de reforestación, y el estado de la cuenca de Valdeinfierno a dicha fecha requería una repoblación de 30000 Ha, (70% del total de su superficie) (Montiel Pinilla, 1948). A mediados del siglo XX las múltiples legislaciones y recomendaciones presentadas para la mitigación de los efectos de las grandes avenidas en la zona no habían sido implementadas (Montiel Pinilla, 1953). No obstante, otras fuentes indican adquisiciones de bosques y de zonas de utilidad pública orientadas a la repoblación por parte de la administración, repobladas entre 1940 y 1970 (Araque Jiménez, 2009). Concretamente, entre 1940 y 1970, fue adquirida el 27.5% de la cuenca de Valdeinfierno para la repoblación forestal (aunque solo se reforestó el 7.1%, y el 16.7% ya consistía inicialmente en bosque). De estas reforestaciones totales, se especifica que entre 1940 y 1952 se repobló el 3.97% y se adquirió el 6.82% de la cuenca que se encontraba ocupada por bosque lo que supone un 10.8% de su extensión total. Toda la información cuantitativa referente a los usos del suelo es de gran utilidad para determinar la extensión de cada una de las coberturas vegetales del suelo. No obstante, las referencias geográficas indicadas en los textos son insuficientes para la reconstrucción espacial, puesto que no contienen información de distribución geográfica. Con el objetivo de resolver dicha limitación se han localizado mapas históricos de la cuenca.

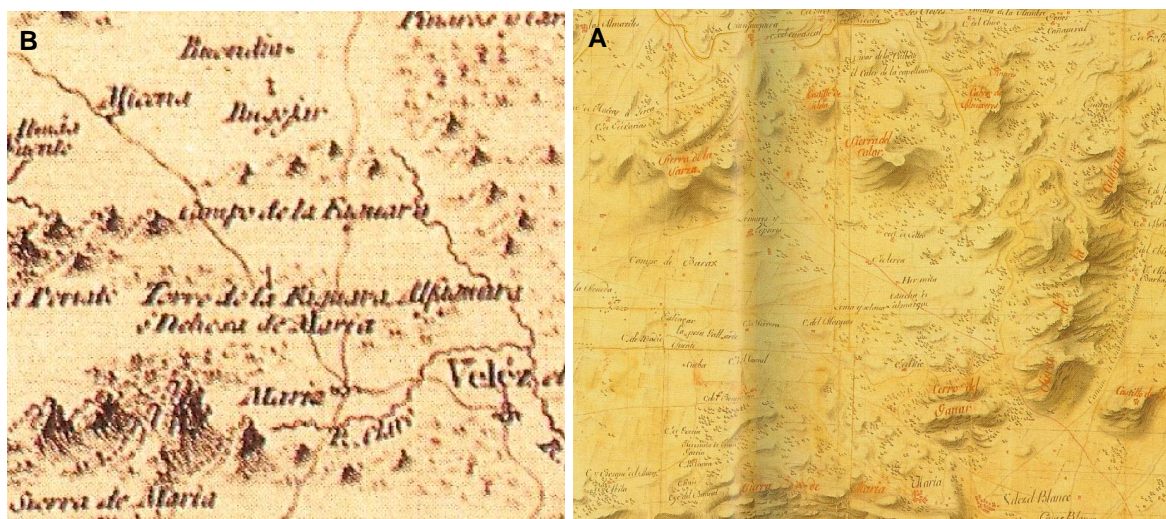


Figura 6.1, parte de los mapas. (A) "Mapa de parte de la jurisdicción de los reinos de Granada y Murcia (Próspero de Verbom, 1721) y (B) "Mapa geográfico del reino de Granada", (D. Tomás López, 1795), elaborados para el Servicio Geográfico del Ejército. extraídos de Gómez Cruz (1991).

Los mapas disponibles más antiguos en los que se puede diferenciar el área de estudio consisten en los presentados en Gómez Cruz (1991), elaborados por el servicio geográfico del ejército, en 1721 (Figura 6.1A) y 1795 (Figura 6.1B), y que se corresponden a los Reinos de Granada y Murcia y al Reino de Granada respectivamente.

En el mapa de 1721 se observa que, de acuerdo con la literatura de finales de siglo XIX, a principios del siglo XVIII existía vegetación boscosa abundante en las partes montañosas de la zona de estudio (incluyendo la zona de la Rambla Mayor). En el mapa de 1795 se observa que la geografía de la cuenca es muy parecida a la actual. A pesar del valor de los mapas, sin más datos descriptivos, éstos no presentan suficiente detalle para su utilización en la modelización hidrológica, fin último de este estudio.

La primera cartografía de detalle disponible con buena resolución y con información de los usos del suelo corresponde al Mapa Topográfico de España a escala 1:50000, disponibles en los fondos de la Cartoteca del Instituto Geográfico Nacional (DGIGCE, 1931a, b, 1935; DGIGC, 1948). Estos mapas han sido publicados en la primera mitad del siglo XX y presentan información sobre las zonas de cultivo y distintas coberturas de vegetación natural. Analizando en detalle los mapas se ha observado que en una gran parte de la cuenca de estudio existe superposición de usos del suelo entre los cultivos y la vegetación natural. Esta información se ha interpretado como campos de cultivo abandonados con anterioridad y considerándose, puesto que en muchos de estos cultivos la vegetación natural superpuesta es arbórea, que la última actividad agrícola practicada en ellas puede corresponderse a finales del siglo XIX.

La información de los usos del suelo presentados en estos mapas del Instituto Geográfico Nacional no es completa ni cubre todas las coberturas naturales y antrópicas contempladas en el presente estudio. Para la elaboración del mapa de usos del suelo representativo de finales del siglo XIX y principios del XX se ha utilizado de base el mapa de 1956 presentado en el capítulo

4 (Junta_de_Andalucía, 2003). Sobre el mapa de 1956 se han superpuesto las zonas de cultivos y cultivos abandonados cartografiados como información de fondo en los mapas topográficos de principio de siglo XX. El resultado de dicha superposición se presenta en la Figura 6.2.

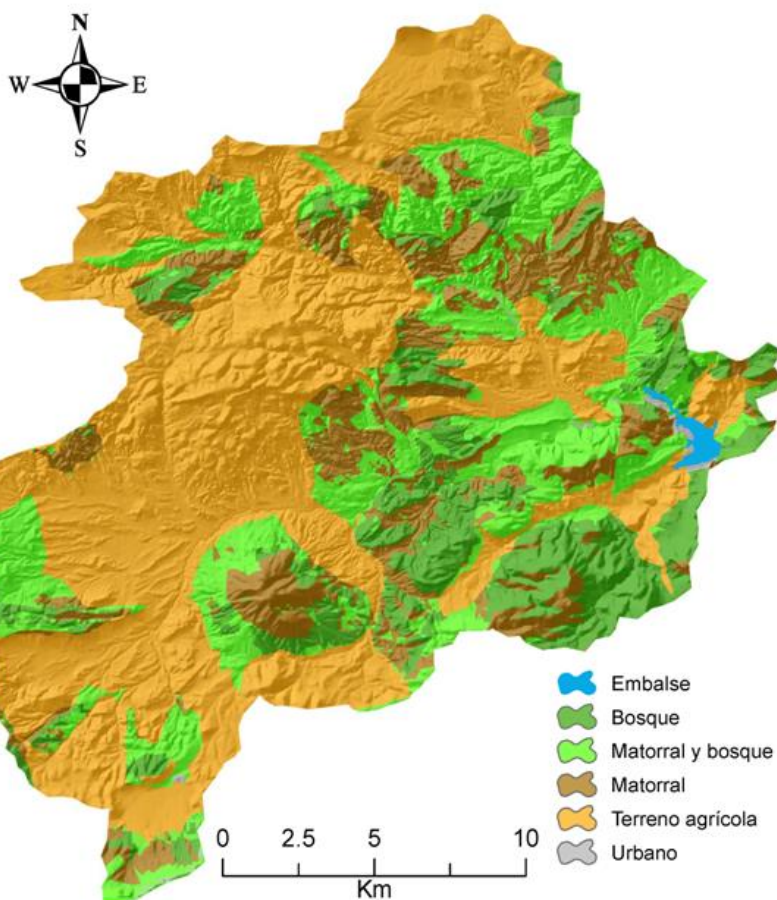


Figura 6.2 Reconstrucción de la distribución de los usos del suelo en la cuenca de Valdeinfierno alrededor del año 1900 (finales del siglo XIX y principios del XX), elaborada a partir de los mapas topográficos de la serie 1:50000 modificando el mapa de usos de 1956 (Junta_de_Andalucía, 2003).

Los mapas topográficos del Instituto Geográfico Nacional no han sido publicados en la misma fecha. Para analizar los posibles errores derivados de su asincronidad, se ha comparado la superposición en la distribución de usos en el límite entre los distintos mapas y se ha comprobado que coinciden, lo que ha llevado a considerar que las diferencias entre ellos son negligibles para el presente estudio.

En el mapa de la Figura 6.2 se observa que existe una mayor proporción de bosque en la mitad sur del mapa (sub-cuenca del río Alcaide), con respecto a norte (sub-cuenca de la Rambla Mayor). Esta diferencia se acentúa comparando el mapa con la vegetación en el área en 1721 presentada en la

Figura 7.1. Los resultados de la comparación y las observaciones sobre el estado y distribución de deforestación en la cuenca coinciden con la información histórica expuesta al inicio del subapartado, y descritos en Araque Jiménez (2009)

Con el objetivo de comparar los datos de la información histórica, expresados en extensiones y porcentajes, con los resultados del mapa de la Figura 6.2, se ha elaborado la Figura 6.3 en la que se presenta la cobertura porcentual de cada uno de los usos de la cuenca.

Los porcentajes presentados en la Figura 6.3 indican que las zonas deforestadas en la cuenca de Valdeinfierno (matorral y terreno agrícola) suponen un 67% de la cuenca de estudio mientras que las zonas forestadas (bosque y mixto) suponen un 33% de la cuenca. Respecto a la bibliografía se observa que según los cálculos de Montiel Pinilla

(1955), se debe repoblar un 70% de la zona de estudio, resultado consistente con el porcentaje obtenido de zonas deforestadas. Comparando los resultados de las zonas forestadas con los porcentajes de usos expuestos por Araque Jiménez (2009), se obtiene que el porcentaje forestado resultante de la figura (33%) es coherente con el valor de 27.5% de propiedad pública del monte. Estos porcentajes son comparables, puesto que tal y como se ha discutido en el capítulo 4, la adquisición pública de montes se centra en zonas de bosque y mixto (matorral y bosque). Considerando todo lo anterior se puede concluir que el mapa presentado supone una muy buena aproximación a los usos del suelo del periodo considerado, a pesar de algunas desviaciones en los porcentajes de los usos atribuibles a las incertidumbres de los datos disponibles y a la superposición de los usos de matorral y bosque (mixto). Por ello, la comprobación de la información cartográfica y de censo forestal constituye una buena información de partida para determinar una configuración de usos del suelo respecto a la que simular la hidrología y el transporte de sedimentos en dicho periodo. Cabe destacar que según las diferencias porcentuales entre la cobertura utilizada y la información histórica, el mapa de usos del suelo considerado supone un escenario. La información disponible anterior a la segunda mitad del siglo XIX se ha considerado insuficiente para poder ser reconstruida espacialmente, por lo que se ha fijado en este periodo (segunda mitad de siglo XIX) el límite máximo para la simulación de la hidrología del pasado histórico.

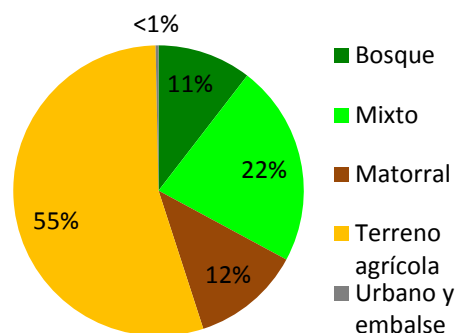


Figura 6.3 porcentaje de cada uno de los tipos de usos del suelo en la cuenca de Valdeinfierno alrededor del año 1900, calculado a partir del mapa de distribución determinado mediante los mapas topográficos de la serie 1:50000 más antiguos disponibles.

6.2. Meteorología en la cuenca de Valdeinfierno entre los siglos XIX y XX

La fiabilidad de la información climática en periodo histórico pre-instrumental presenta un elevado grado de incertidumbre, que se acentúa progresivamente hacia el pasado (Rodrigo y Trigo, 2007). Generalmente las series instrumentales disponibles cubren periodos relativamente recientes (segunda mitad del siglo XX) y pierden continuidad a medida que su periodo se

amplía hacia el pasado (Almarza Mata, 1996). La pérdida de continuidad conlleva que, para poder ser utilizadas para la simulación hidrológica y de transporte de sedimentos, tienen que ser total o parcialmente reconstruidas.

La reconstrucción climática se puede plantear desde distintas aproximaciones. La más comúnmente utilizada es determinar la climatología mediante series sinópticas de reanálisis. Algunos de los reanálisis más utilizados son el NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996), el ERA-40 (Uppala et al., 2005), el JRA-25 (Onogi et al., 2007), el ERA-Interim (Dee et al., 2011) y el reanálisis del siglo XX (20CR, Compo et al., 2011). Una segunda aproximación consiste en utilizar los registros regionales e históricos como base para reconstrucción de la meteorología, ya sea directamente del registro documental (Rodrigo y Barriendos, 2008), comparándolos con estaciones con series instrumentales largas (Casty et al., 2005; Machado et al., 2011) o combinando la información de los registros históricos con los modelos de circulación climática o de reanálisis (Pauling et al., 2006).

En el presente capítulo se han considerado las dos aproximaciones para discutir y valorar la que más se ajusta a la meteorología en la cuenca de Valdeinfierno, y reconstruir esta meteorología para la última parte del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX en las que no se tienen datos instrumentales.

6.2.1. Reconstrucción de la precipitación

En la cuenca de Valdeinfierno se dispone de datos de precipitación muy discontinuos en una de sus estaciones de medida desde 1918, en múltiples estaciones desde 1942 y continuos desde 1960. Tal y como se ha expuesto en el capítulo 4, esta base de datos de precipitación permite la modelización de la hidrología de la cuenca en el periodo instrumental 1971-2012, limitada por la información de caudal. Esta información es insuficiente para recrear las condiciones hidrológicas de principios de siglo del XX debido a la discontinuidad en las series. La reconstrucción de la precipitación se ha determinado según las dos aproximaciones planteadas anteriormente en base a los modelos de reanálisis y la información regional disponible.

6.2.1.1. Precipitación mediante modelos de reanálisis

En el presente sub-apartado se pretende analizar la correspondencia existente entre las series de reanálisis global y la precipitación instrumental de la cuenca de Valdeinfierno con la mayor amplitud temporal posible. No se han considerado los reanálisis que solo comprenden las dos últimas partes del siglo XX debido a que en dicho periodo existen datos meteorológicos continuos en la cuenca. El reanálisis escogido ha sido el 20CR, puesto que su registro empieza

en 1871, por lo que es sensiblemente anterior a los demás reanálisis (NCEP/NCAR empieza en 1948, el del ERA-40 en 1957 y los del JRA-25 y el ERA-Interim empiezan en 1979).

El reanálisis 20CR consiste en un conjunto de variables sinópticas entre las que se incluyen la precipitación y temperatura (mínima media y máxima), con una resolución temporal diaria y mensual entre 1871 y 2008, y con una resolución espacial por celda de datos de 2° en latitud y longitud (unos 12300 Km²). Cada una de las variables presenta un total de 56 valores simulados para cada celda e intervalo de tiempo que definen el rango de valores de la variable (Compo et al., 2011). Se ha considerado tres conjuntos de series distintas en función de los valores simulados. El primer conjunto se ha calculado con la media de los 56 valores, el segundo conjunto con el valor máximo para cada intervalo de tiempo y el tercer conjunto con el mínimo.

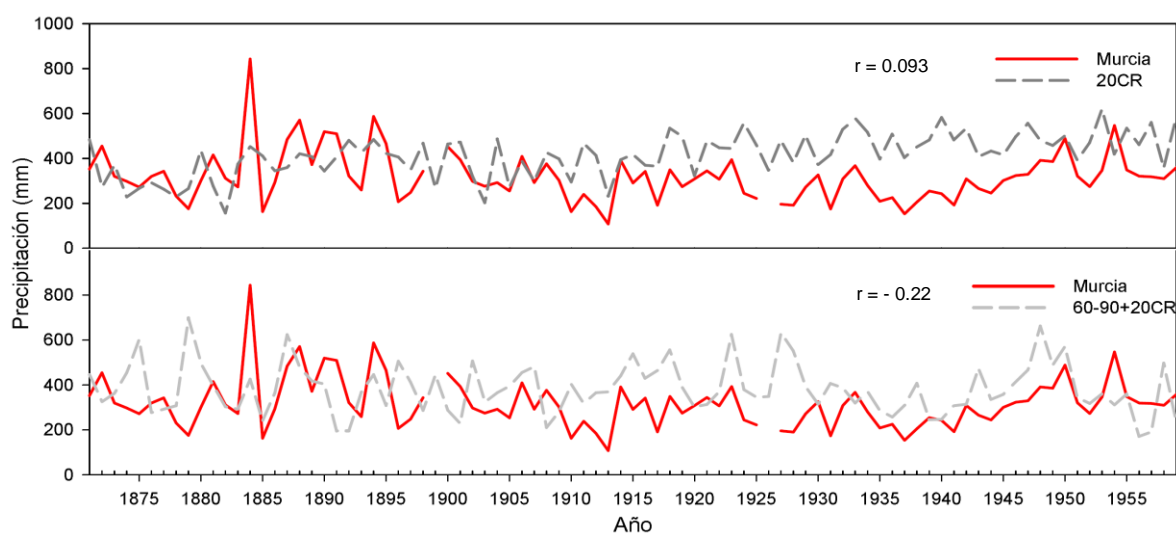


Figura 6.4 Comparación de la precipitación anual acumulada en la estación de Murcia frente a la media de los resultados del reanálisis 20CR (arriba), y la media de las series en las estaciones de Valdeinfierno del periodo de referencia añadiéndole las anomalías calculadas sobre el 20CR (60-90+20CR, abajo), a lo largo del periodo 1871-1959.

La precipitación se ha determinado utilizando la misma técnica que en el capítulo anterior. De esta manera, se han calculado las anomalías mensuales de la serie 20CR (media máxima y mínima) en intervalos de 30 años (1871-1900; 1901-1930; 1931-1960) respecto al intervalo de referencia 1961-1990. Las anomalías resultantes se han aplicado sobre las series meteorológicas sintéticas 1961-1990 calculadas en el capítulo anterior mediante el modelo GLIMCLIM, para cada estación de la cuenca de Valdeinfierno.

Debido al tamaño de celda del reanálisis 20CR, la estación meteorológica de Murcia, de la que se dispone datos de precipitación desde 1861, se encuentra en la misma celda que Valdeinfierno. La superposición de la celda con la estación de Murcia y la longitud de datos de la estación, permite comparar la correlación entre la serie de reanálisis y la serie instrumental. Se ha utilizado el coeficiente de correlación de Pearson para comparar la linealidad de la precipitación acumulada mensual en Murcia con la precipitación media del reanálisis y con la

de la media de la precipitación calculada en las estaciones de Valdeinfierno mediante el periodo de referencia (1961-1990) y las anomalías (60-90+20CR). El resultado de dichas comparaciones indica que no existe correlación significativa entre ninguna de las dos series de precipitación acumuladas estimadas utilizando el reanálisis con la de Murcia (0.093 frente a 20CR y -0.22 frente a 60-90+20CR). Con el objetivo de contrastar la divergencia entre las precipitaciones calculadas y la serie de Murcia a lo largo del tiempo, se han comparado las series anuales de precipitación entre cada una de las dos series calculadas con la de Murcia (Figura 6.4), y la precipitación acumulada media de cada mes, considerando toda la serie 1871-1959 (Figura 6.5).

En la Figura 6.4, se observa que la curva para la serie 20CR presenta una concordancia mayor entre los picos anuales de precipitación mayores y menores con la serie de Murcia, que la serie 60-90+20CR. No obstante, debido a que entre 1915 y 1950, la diferencia entre las curvas de 20CR y Murcia es mayor que entre las curvas de 60-90+20CR, y a pesar de las discordancias entre los picos, se considera que la serie 60-90+20CR es más representativa de la precipitación inter-anual en Murcia que la serie 20CR.

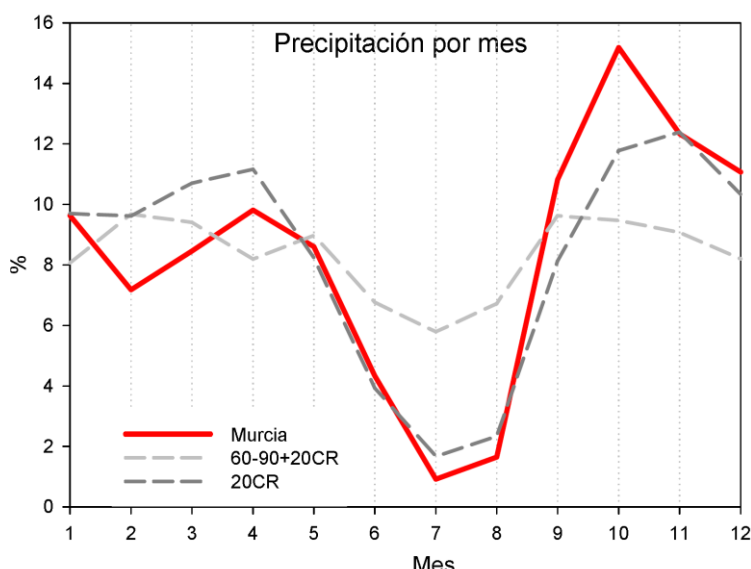


Figura 6.5 Comparación de la precipitación acumulada mensual media en la estación meteorológica de Murcia frente a la media de los resultados del reanálisis 20CR, y la media de las series en las estaciones de Valdeinfierno del periodo de referencia añadiéndole las anomalías calculadas sobre el 20CR (60-90+20CR), para todo el periodo 1871-1959.

El ajuste de la precipitación mensual media de toda la serie, presenta una mayor correlación entre la serie de Murcia y la serie 20CR que entre cualquiera de las dos y la serie 60-90+20CR (Figura 6.5). Se observa que la aplicación de las anomalías del reanálisis 20CR sobre la serie sintética de referencia 60-90, genera una disminución de las precipitaciones de otoño y primavera y un aumento de las precipitaciones estivales, homogeneizando la precipitación a lo largo de todo el año. Este resultado no es coherente con el comportamiento de la cuenca de Valdeinfierno observado en periodo instrumental.

La comparación de los datos de precipitación de reanálisis con la serie de Murcia indica que, a nivel mensual (total), la correlación de la serie de Murcia respecto al reanálisis 20CR es mayor que frente a la serie 60-90+20CR. A nivel inter-anual sucede al contrario, la divergencia en los resultados da a entender que la reconstrucción de la precipitación en la zona de estudio mediante series de reanálisis no es representativa del régimen real (instrumental) de precipitación en Murcia (y por extensión, de Valdeinfierno). A pesar de este resultado, la correspondencia a nivel mensual entre la serie 20CR y la serie de Murcia indica que los datos

del reanálisis pueden ser utilizados puntualmente para completar la falta de datos en las series instrumentales.

6.2.1.2. Precipitación mediante información regional

Una segunda aproximación a la precipitación previa al periodo instrumental en la cuenca de Valdeinfierno consiste en la asimilación de información regional. Esta metodología considera que las condiciones de las zonas próximas a la cuenca tendrán un comportamiento climático similar y que, por lo tanto, se puede utilizar la información meteorológica regional para complementar las series instrumentales. Las series de precipitación de las estaciones contenidas en la cuenca de Valdeinfierno suponen una buena base de partida debido a su cobertura temporal.

La estación meteorológica más cercana a la cuenca, con una climatología relativamente parecida y una serie instrumental larga, es la estación de Murcia. Dicha estación, cubre de forma muy continua el periodo comprendido entre 1863 y la actualidad. Para determinar la equivalencia de la precipitación en esta estación con la media de las estaciones de Valdeinfierno, se ha determinado la correlación entre las series mensual y anual de precipitación a lo largo del periodo de superposición de los datos. Se ha obtenido que la correlación bivariada de Pearson entre las estaciones es significativa, tanto a escala mensual como a escala anual, con unos coeficientes de correlación de 0.596 y 0.4 respectivamente. Estos resultados indican por un lado que las series están correlacionadas, y por otro, que la correlación es mayor a menor escala temporal. La comparación entre las series anuales de precipitación de Murcia y Valdeinfierno, ha permitido contrastar sus similitudes (Figura 6.6).

En la Figura 6.6 se observa que, con excepciones puntuales, existe una buena correlación entre los picos máximos y mínimos de la precipitación entre la estación de Murcia y la media de las distintas estaciones de Valdeinfierno, y que los aumentos y descensos de precipitación inter-anual, también coinciden entre las series (al contrario que en las series de reanálisis). Se puede apreciar que la mayor divergencia entre las series se produce para el primer tercio del gráfico, que coincide con el intervalo 1942-1960. Dicho intervalo corresponde a un periodo de datos discontinuos en más de una estación, lo que implica que en muchas de las fechas de este intervalo la precipitación representada en la serie tan solo pertenece a la información de una de las 13 estaciones de medida. Por lo tanto, las variaciones de precipitación en el intervalo son muy sensibles a la variabilidad o a la falta de datos en estaciones puntuales. La alta correlación entre las series indica un efecto menor de las fluctuaciones expuestas. Los resultados indican que adaptar la precipitación en Valdeinfierno a la precipitación en Murcia para el periodo 1863-1960 es una buena aproximación orientada a la simulación hidrológica de la cuenca.

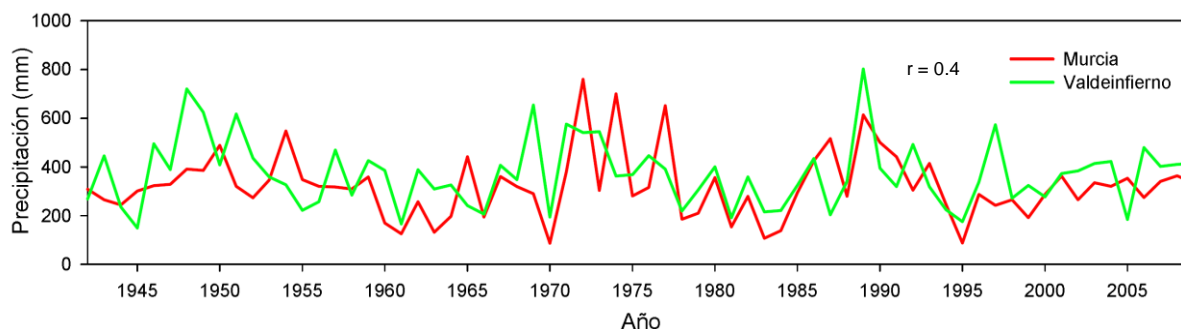


Figura 6.6 Comparación de la precipitación acumulada anual entre la estación meteorológica de Murcia frente a la media de las estaciones de Valdeinfierno del periodo 1942-2009.

Otra posible aproximación a la precipitación relacionada con los datos regionales es la planteada por Pauling et al (2006). Dicha aproximación consiste en combinar información regional histórica con las series de reanálisis. El autor propone una distribución de precipitación calculada sobre Europa a escala estacional con una resolución espacial de 0.5 grados en latitud y longitud para el intervalo 1500-1983 (~3100 Km²; 1/4 del tamaño de celda del reanálisis 20CR). Se ha comparado la precipitación estacional entre la serie extraída de los datos de Pauling et al. (2006) con la precipitación instrumental en Murcia. La elección de dicha estación se debe a que se ha observado que la correlación entre Murcia y Valdeinfierno es significativa y la coincidencia temporal entre la serie de Murcia y la serie de Pauling et al.(2006) es más elevada que entre esta última y la de Valdeinfierno (120 años frente a 23). El cálculo de la correlación entre las dos series de precipitación ha permitido determinar que no se correlacionan ($r=0.133$). A pesar de que esta correlación es mejor que la obtenida en las series de reanálisis, no resulta tan representativa como para poder ser considerada significativa. La divergencia entre las precipitaciones calculadas y la serie de Murcia se ha analizado comparando las series anuales de precipitación de Pauling et al. (2006) y de Murcia (Figura 6.7).

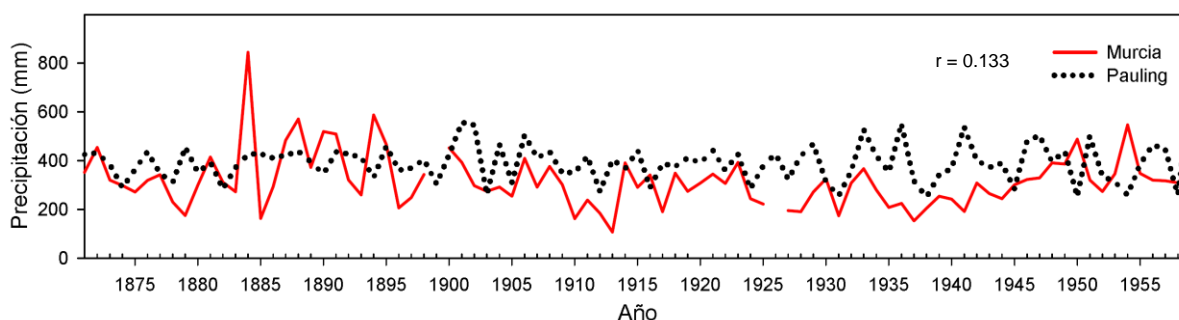


Figura 6.7 Comparación de la precipitación acumulada anual entre la estación meteorológica de Murcia frente a la Precipitación determinada por Pauling et al. (2006) a lo largo del periodo 1871-1959.

En la Figura 6.7, se puede apreciar que la curva de la serie de Pauling et al. (2006) presenta una concordancia relativamente buena entre los picos anuales de precipitación mayores y menores con la serie de Murcia. A pesar de esta correlación de picos, al igual que en la comparación con el reanálisis 20CR, se observa un aumento en la anomalía entre las curvas en el periodo 1915-1950. La similitud en el periodo y la diferencia respecto a Murcia entre dos metodologías de determinación de la precipitación tan distintas puede ser indicativa de una fluctuación en la

precipitación determinada por procesos de mesoescala no reproducible por los modelos de circulación climática globales. En cualquier caso, se constata que la reconstrucción de la precipitación de Pauling et al. (2006) no es representativa del régimen real de la precipitación en Murcia y, por extensión, en Valdeinfierno.

6.2.1.3. *Precipitación reconstruida en las estaciones de Valdeinfierno*

La comparación de distintas metodologías orientadas a la reconstrucción de la precipitación anterior al periodo instrumental en la cuenca de Valdeinfierno ha permitido evaluar cuál es la mejor aproximación. De todas las series de precipitación obtenidas, la única que se correlaciona con las estaciones de la cuenca de estudio es la serie instrumental de la estación de Murcia. No obstante, la implementación de la precipitación de dicha estación sobre las estaciones de Valdeinfierno presenta una limitación geográfica importante. La distancia lineal entre la cuenca de Valdeinfierno y la estación de medida de Murcia es de entre 75 y 100 Km, dependiendo del punto de la cuenca considerado, y las diferencias de cota pueden superar los 1000 m entre estaciones. Estas diferencias geográficas influyen sensiblemente sobre las intensidades, distribución, e incluso presencia/ausencia de precipitación en Valdeinfierno respecto a Murcia.

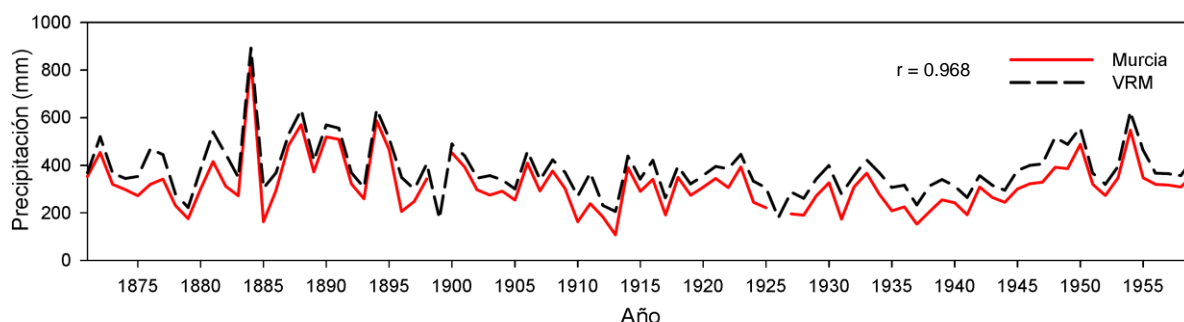


Figura 6.8 Comparación de la precipitación acumulada anual entre la estación meteorológica de Murcia frente a la media de la precipitación reconstruida en las estaciones de Valdeinfierno utilizando la serie de Murcia (VRM), a lo largo del periodo 1871-1959.

Anteriormente, se ha determinado que existe una buena correlación entre la media de las estaciones de Valdeinfierno y la serie de Murcia en periodo instrumental. Esta buena correlación ha sido utilizada para la corrección de las diferencias entre la estación de Murcia y las ubicadas en la cuenca de estudio. Se ha mantenido la distribución temporal de la precipitación de Murcia y se ha adaptado la intensidad diaria a cada una de las trece estaciones de Valdeinfierno. Ésta corrección se ha calculado mediante la determinación de la anomalía mensual de cada serie de cada estación de la cuenca de estudio frente a la serie de Murcia. De este modo, la anomalía calculada consiste en una anomalía espacial distinta a la anomalía temporal utilizada para adaptar las series de reanálisis descrita en la primera parte del presente sub-apartado y en el capítulo anterior. El resultado de la media de la precipitación anual reconstruida en las estaciones de Valdeinfierno (Valdeinfierno Reconstruido Murcia, VRM) frente a la serie de Murcia se puede observar en la Figura 6.8.

En la Figura 6.8, se puede identificar que, al aplicar la anomalía espacial sobre las series de Valdeinfierno, su media muestra una mayor precipitación que la serie de Murcia. Se ha analizado la distribución de dicha precipitación a lo largo del año con la finalidad de determinar la influencia en el ciclo anual de la precipitación mensual. Para este fin, se ha elaborado la curva de distribución anual de la precipitación de las series de Murcia, la media de las de Valdeinfierno en periodo instrumental, y la media de las reconstruidas utilizando la serie de Murcia (Figura 6.9)

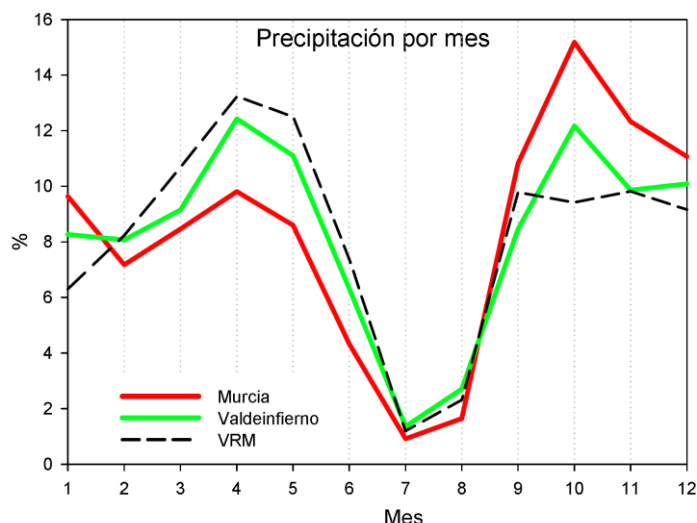


Figura 6.9 Comparación de la precipitación mensual entre la estación meteorológica de Murcia frente a la media de la precipitación de las estaciones de Valdeinfierno, y la media de la precipitación reconstruida en las estaciones de Valdeinfierno utilizando la serie de Murcia (VRM).

En la Figura 6.9, se observa que hay una buena correlación entre la reconstrucción VRM y las medidas instrumentales en Valdeinfierno, principalmente en las precipitaciones de primavera y otoño. El hecho que la curva VRM sea más representativa de la tendencia mensual de Valdeinfierno que de la de Murcia sobre la que está calculada, conjuntamente con su similitud anual con la distribución de la estación de Murcia, permite afirmar que las series de precipitación VRM son una metodología adecuada a la aproximación de la precipitación en la cuenca de estudio.

Una vez definidas las series que más se ajustan a la intensidad y distribución temporal de la precipitación sobre la cuenca de Valdeinfierno queda definir la distribución espacial de dicha precipitación. La distribución de la precipitación presenta importantes variaciones en todo el Sureste peninsular. Los principales factores que influyen esta variabilidad son las importantes diferencias orográficas y el contraste entre las influencias Atlántica y Mediterránea (Gonzalez-Hidalgo et al., 2009; Herrera et al., 2010). Estas diferencias conllevan que, en distintos puntos de la región de Murcia, la distribución e intensidad de la precipitación puede presentar importantes variaciones espaciales (Acero et al., 2012). Comparando la precipitación determinada por las series VRM con la información histórica de grandes avenidas en la cuenca del Guadalentín (p. e. (Gil Olcina, 1968; Calvo García-Tornel, 1969), se ha observado que grandes eventos como el de 1879 no se reflejan en la precipitación. La falta de concordancia indica que, si se pretende reconstruir la hidrología incluyendo los grandes eventos ocurridos en la cuenca de estudio, es necesario incorporar en la serie reconstruida a la información de los eventos singulares tanto como de paleoavenidas. En la cuenca de Valdeinfierno los caudales

históricos y de paleoavenidas han sido reconstruidos para los últimos 500 años por Benito et al. (2010). La información extraída de los caudales históricos y de paleoavenidas ha sido utilizada para determinar los eventos de precipitación que deben ser corregidos y los que deben ser añadidos a las series de precipitación VRM. El carácter cualitativo de la mayor parte de la información histórica limita en muchos casos la adaptación entre las series. En nuestro caso, la escasa información cuantitativa disponible consiste en valores de caudal y de volumen de agua transportada (no de precipitación). Con el objetivo de determinar la precipitación que han generado las avenidas durante el periodo histórico y que no se reflejan en las series VRM, se ha elaborado una reconstrucción de la precipitación en base al volumen de agua transportado durante dichos eventos.

La restitución de la precipitación en base al caudal transportado queda limitada por la longitud del registro instrumental en la presa de Valdeinfierno (sin datos anteriores a 1971). Debido a que aguas abajo de Valdeinfierno se encuentra el embalse de Puentes, cuyo registro instrumental empieza en 1942, se ha planteado la posibilidad de determinar la representatividad de los caudales de Puentes respecto a Valdeinfierno, ya que si estos se correlacionasen, sería posible estimar parámetros hidrológicos de las avenidas que se han producido en el alto Guadalentín tres décadas antes de los registros en Valdeinfierno. Un valor añadido al hipotético uso de los datos del embalse de Puentes para la reconstrucción de los eventos de precipitación máxima es el de que se trata del embalse más importante de la zona, y por consiguiente, la mayoría de las referencias históricas de eventos importantes hacen referencia al volumen acumulado en este embalse. Por lo tanto, de ser representativos los caudales de aporte a Puentes de los caudales de aporte a Valdeinfierno, sería posible reconstruir el efecto en la cuenca de estudio de los eventos históricos mayores.

Al contrario que para la precipitación en Murcia, el caudal de acumulación en Puentes depende del área de recepción y, por lo tanto, existe una variable espacial con respecto al caudal en Valdeinfierno (la cuenca de Valdeinfierno cubre un tercio de la de Puentes). El análisis de las variables hidrográficas en ambas presas, para el periodo instrumental en el que sus registros se solapan, ha permitido constatar que la proporción de caudal entre Puentes y Valdeinfierno no es regular. Puentes tiene un entrada mensual de aproximadamente 1 Hm^3 , frente a la general falta de aportes de Valdeinfierno, mientras que en periodos puntuales durante un evento extremo (e.g. Octubre de 1973), el aporte en cada embalse es proporcional a su cuenca (72.6 Hm^3 y 21.2 Hm^3 ; ~30%, respectivamente). En eventos intermedios (e.g. Septiembre de 1989), pueden existir variaciones hidrológicas desproporcionadas entre ambas cuencas (7.3 Hm^3 y 4.5 Hm^3 ; ~60%, respectivamente). Esta variabilidad no puede reproducirse con la diferencia de las medias de cada estación ni con una proporción entre sus valores. Para determinar la relación entre los aportes a los dos embalses se ha desarrollado una fórmula de correlación mediante el cálculo de una anomalía (ecuación 6.1), a partir de la superposición de sus datos mensuales en el periodo instrumental (1971 a 2000; 30 años). Inicialmente, se ha calculado el volumen medio mensual de entrada en Puentes en los meses en los que el caudal en Valdeinfierno es

nulo. El valor resultante (1.06 Hm^3) se ha considerado como el volumen mínimo para que exista un aporte en Valdeinfierno. Dichos aportes se han calculado utilizando la ecuación 6.1.

$$V = P - A * P \quad 6.1$$

Donde:

- V Es el volumen de agua en Valdeinfierno en Hm^3 .
- P Es el volumen de agua en Puentes en Hm^3 .
- A Es el valor de la anomalía entre Puentes y Valdeinfierno con un valor de 0.6744, calculada utilizando la misma ecuación, en el periodo de superposición de los datos de las dos presas.

Calculando el volumen acumulado en Valdeinfierno utilizando la ecuación 6.1 y comparando los resultados con el volumen medido a lo largo del periodo instrumental (1971-2000), se ha obtenido que la correlación entre ambas series es altamente significativa ($r= 0.997$; $NS= 0.71$). Por consiguiente, la serie de caudales generada es representativa del comportamiento de la cuenca y se puede aplicar el cálculo de la anomalía desarrollado para determinar el volumen aportado a Valdeinfierno durante eventos de los que tan solo hay datos en Puentes. Los datos de Puentes frente a los datos de Valdeinfierno, incluyendo la reconstrucción de la serie en esta estación, para el periodo 1942-2000, se presentan en la Figura 6.10.

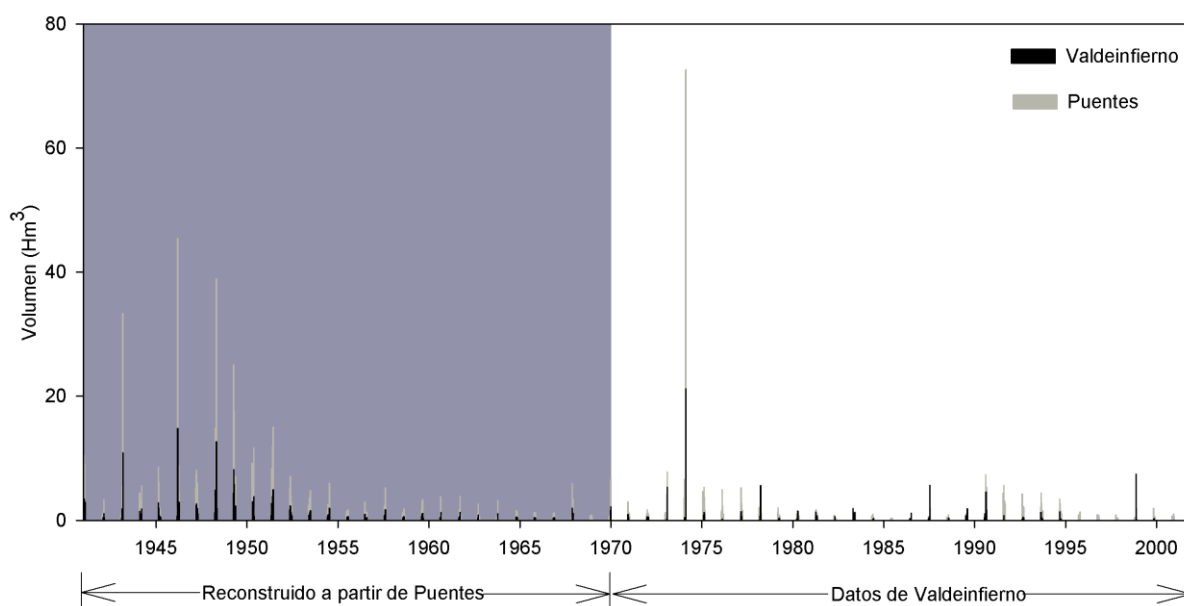


Figura 6.10 Volumen mensual en los embalses de Puentes y Valdeinfierno entre 1942 y 2000, en los que la serie de Valdeinfierno se ha reconstruido respecto a la serie de puentes, desde 1942 a 1970.

La correlación entre los datos de volumen en Puentes y Valdeinfierno supone una herramienta muy útil para determinar la escala de los eventos extremos sobre la cuenca de estudio. No obstante, para poder simular la hidrología, es necesario conocer la precipitación que ha generado cada uno de los eventos. Para la determinación de dicha precipitación (tanto para los eventos históricos como los registrados en Puentes) se ha comparado el caudal calculado con los caudales observados en la serie instrumental de Valdeinfierno, localizando rangos de precipitación que hayan generado un volumen de escorrentía equivalente. Estas precipitaciones han sido adaptadas e incluidas a las series de precipitación VRM en los eventos localizados en los registros, no presentes en la precipitación de Murcia.

Fecha	Origen de los datos	Añadido/Eliminado
13/03/1867	serie de Murcia	Eliminado
14/10/1879	r. documentales (Madariaga, 1898; Muñoz Bravo, 1989) y naturales (Benito et al., 2010)	Añadido
13/12/1881	serie de Murcia	Eliminado
20/4/1890	serie de Murcia	Eliminado
11/09/1891	r. documentales (López-Bermúdez et al., 1978) y naturales (Benito et al., 2010)	Añadido
11/09/1894	r. documentales (Calvo García-Tornel, 1969)	Añadido
26/06/1900	r. documentales (Gil Olcina, 1968) y naturales (Benito et al., 2010)	Añadido
24/12/1923	serie de Murcia	Eliminado
21/04/1946	r. documentales (López-Bermúdez et al., 1978; Conesa Garcia, 1985) y aforos	Añadido
22/04/1946	r. documentales (López-Bermúdez et al., 1978; Conesa Garcia, 1985) y aforos	Añadido
23/04/1946	r. documentales (López-Bermúdez et al., 1978; Conesa Garcia, 1985) y aforos	Añadido
12/09/1946	r. documentales (López-Bermúdez et al., 1978; Conesa Garcia, 1985) y aforos	Añadido
22/10/1948	r. documentales (López-Bermúdez et al., 1978; Conesa Garcia, 1985) y aforos	Añadido
23/12/1951	r. documentales (López-Bermúdez et al., 1978) y aforos	Añadido
10/06/1953	serie de Murcia	Eliminado
24/03/1954	serie de Murcia	Eliminado
30/01/1956	serie de Murcia	Eliminado
25/01/1965	serie de Murcia	Eliminado
10/01/1968	serie de Murcia	Eliminado

Tabla 6.1: Eventos añadidos o eliminados de las series de precipitación en Valdeinfierno reconstruidas sobre La serie de Murcia (VRM), en base a los registros documentales y naturales, los registros parciales de las estaciones en Valdeinfierno y los registros aforo en la presa de Puentes.

En la de la serie registrada en Murcia se han identificado precipitaciones de gran magnitud que no se reflejan en los caudales de puentes y las observaciones históricas en el alto Guadalentín. Estos eventos, presentes en las series VRM, se han eliminado debido a que se ha considerado que se deben a precipitaciones locales de Murcia. La corrección de eventos se ha elaborado determinando el caudal mínimo para que un evento sea clasificado en el registro documental como catastrófico, y calculando su precipitación asociada (~ 70 mm/día). Todos los eventos de la serie VRM por encima de dicho valor sin réplica en los registros documentales, naturales o en el registro de Puentes, han sido eliminados. Los eventos incluidos o eliminados sobre las series de precipitación VRM se presentan en la Tabla 6.1.

Las series de precipitación resultantes del proceso de filtrado y reconstrucción de eventos extraordinarios se han denominado series de Precipitación en Valdeinfierno reconstruidas con información histórica y la serie de Murcia (VHRM). Estas series son coherentes con toda la información que ha podido ser recopilada en la cuenca de estudio. Las precipitaciones VHRM y VRM han sido utilizadas para la simulación hidrológica y de transporte de sedimentos en la cuenca de estudio durante el periodo 1863-1970. Se ha simulado con ambos grupos de series con el fin de comparar las diferencias en los resultados entre las dos aproximaciones.

6.2.2. Reconstrucción de la temperatura

El registro instrumental de temperatura en la cuenca de Valdeinfierno es más corto que la precipitación pero contiene datos de calidad desde el inicio del registro en 1942. Las series de temperatura obtenidas mediante el reanálisis (NCEP/NCAR, ERA-40, JRA-25 y ERA-Interim) resultan igualmente cortas e insuficientes para el objetivo de este estudio. Por lo tanto, al igual que en la precipitación, el reanálisis escogido para determinar la temperatura ha sido el 20CR, cuyo registro empieza en 1871.

En la reconstrucción de la precipitación se ha determinado que las series y datos regionales presentan una mayor correlación con el área de estudio que las series dependientes de las variables climáticas. Sin embargo, las series de reanálisis de temperatura presentan una buena correlación sobre las series instrumentales en áreas mediterráneas (Feidas et al., 2004; Hertig et al., 2010). Con el objetivo de contrastar el ajuste de cada aproximación, se ha decidido comparar las series de temperatura del reanálisis con las regionales y las instrumentales en Valdeinfierno.

Regionalmente, se ha utilizado la serie instrumental de la estación de Murcia reconstruida y homogeneizada por Brunet et al.(2006; 2007), que consiste en datos diarios y mensuales desde 1863 hasta la actualidad. La temperatura media mensual entre la estación de Murcia, la media de los *ensembles* del 20CR, y la media de las series en las estaciones de Valdeinfierno ha mostrado una buena correlación($r=0.977$ entre Murcia y Valdeinfierno, $r=0.978$ entre Valdeinfierno y 20CR, y $r=0.989$ entre Murcia y 20CR). Se ha contrastado la correlación entre las temperaturas a lo largo del tiempo utilizando las medias anuales de cada una de las series (Figura 6.11) y la temperatura media de cada mes (Figura 6.12).

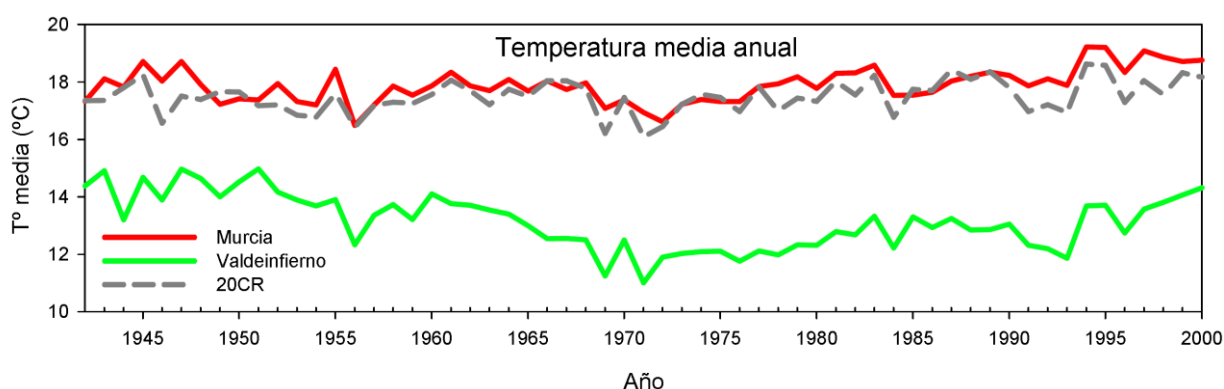


Figura 6.11 Comparación de la temperatura media anual entre la estación meteorológica de Murcia frente a serie resultante de la media de las estaciones de Valdeinfierno y de los resultados del 20CR a lo largo del periodo 1942-2000.

En la Figura 6.11 se observa que la serie de reanálisis es generalmente superior a las demás series excepto en los intervalos 1950-1951, 1967-1968, 1973-1975 y 1985-1988, en los que la serie de Murcia es superior. Por el contrario, se identifican valores de la serie de reanálisis anormalmente altas respecto a las demás en los intervalos 1945- 1950 y 1990-2000.

La serie con las temperaturas más bajas que de las representadas en la Figura 6.11 es la de la media de las series de Valdeinfierno debido a sus estaciones son las que se encuentran a mayor altitud. Las variaciones fluctúan entre -2°C (1947) y 6°C (1971 y 1976) con un marcado descenso relativo de la curva de Valdeinfierno entre 1960 y 1966. Otra característica observable en la Figura 6.11 es que hacia mediados de los 90 la curva de Valdeinfierno aumenta en mayor proporción que las otras dos. Comparando en detalle las direcciones de los picos de temperatura se observa que las tendencias en Valdeinfierno desde el inicio de la serie hasta 1960 se asemejan mucho más a las de la curva de Murcia que a las del 20CR (coeficiente de Pearson de 0.57

frente a 0.45), mientras que a partir de 1968 esta similitud se invierte ($r= 0.81$ y $r= 0.83$ respectivamente).

Respecto a la tendencia por mes, en la Figura 6.12 se observa que la variación entre las series de Murcia y 20CR es mayor que la tendencia inter-anual de la Figura 6.11, siendo la primera alrededor de dos grados superior en invierno e inferior en verano. En cambio, entre las curvas correspondientes a las series de Murcia y Valdeinfierno se observa que la diferencia se mantiene constante ($\sim 4, 5$ grados) entre las dos figuras.

Cabe la posibilidad de que las diferentes tendencias en invierno y verano entre las curvas de Murcia y el 20CR presentes en la Figura 6.12 sean las causantes de la variación en la serie máxima presentada en la Figura 6.11. Las dos posibles hipótesis, según los resultados mensuales son: 1) La variación se produce por una sobreestimación en el reanálisis debido a un periodo estival especialmente cálido; 2) Se produce una subestimación de un periodo invernal inusualmente frío. Independientemente de la curva con mayor o menor temperatura mensual entre las series de reanálisis y de Murcia, tanto los coeficientes de correlación calculados como las distribuciones anual y mensual de la temperatura media permiten determinar que, tanto las series de temperatura del reanálisis 20CR como la serie de temperaturas de Murcia, son metodologías fiables para la determinación de serie de temperaturas de Valdeinfierno, sobre la que presentan una diferencia relativamente constante en el tiempo.

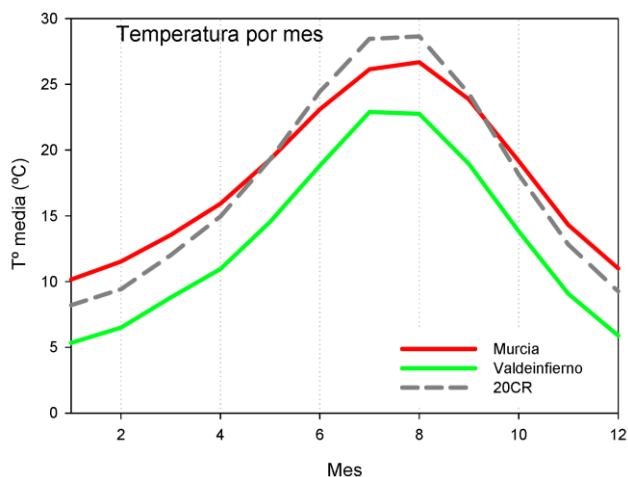


Figura 6.12 Comparación de la temperatura mensual media entre la estación meteorológica de Murcia, la serie resultante de la media de las estaciones de Valdeinfierno, y la media resultante de los *ensembles* del 20CR, para todo el periodo 1942-2000.

Se ha observado que las series de Murcia y 20CR son muy parecidas en magnitud, pero solo una de ellas puede ser utilizada como base sobre la que calcular la serie de temperaturas en Valdeinfierno más allá del periodo instrumental de sus estaciones (aunque la serie escogida puede ser completada con la otra). La serie escogida ha sido la de Murcia por tres motivos; Mayor amplitud temporal; Mayor correlación en el siglo XIX.; Mayor similitud en la variación inter-mensual.

La adaptación de los datos de temperatura se ha calculado de la misma forma que para la precipitación. Se ha mantenido la distribución temporal de Murcia, y se ha adaptado la temperatura diaria (media, máxima y mínima) a cada una de las trece estaciones de Valdeinfierno mediante el cálculo de la anomalía mensual de la serie de la estación frente a la serie de Murcia. Sobre las series resultantes se ha calculado la evapotranspiración potencial,

aplicando la fórmula de Hargreaves (Allen et al., 1998), tal y como se ha expuesto en el capítulo 4. La precipitación y evapotranspiración potencial han sido introducidas en el modelo TETIS - SED para simular la Hidrología y el transporte de sedimentos en la cuenca de Valdeinfierno desde 1863 hasta el inicio del periodo instrumental (1971).

6.3. Simulación de la Hidrología y el transporte de sedimentos en la cuenca de Valdeinfierno

La combinación de las series de precipitación determinadas por las diferentes metodologías junto con las series de evapotranspiración calculadas a partir de la temperatura ha permitido la simulación hidrológica y de transporte de sedimentos en la cuenca de estudio. Dicha simulación se ha realizado con el modelo distribuido TETIS-SED.

Las simulaciones se han elaborado considerando dos posibles configuraciones de usos del suelo en el intervalo 1931-1960. Dicha diferenciación de usos ha sido desarrollada debido a que se han considerado los intervalos de simulación en periodos de 30 años, y en el intervalo 1930-1960 se superponen dos informaciones. Por un lado algunos textos históricos indican que no se toman medidas de reforestación en la cuenca de Valdeinfierno hasta mediados de la década de 1950 (Montiel Pinilla, 1948, 1953, 1955). Por otro, existe la información espacial de la distribución de usos del suelo de 1956 (Junta_de_Andalucía, 2003). Debido a que solo se puede introducir una única configuración de usos del suelo, se ha simulado la hidrología del periodo considerando cada una de las configuraciones por separado. De este modo se obtienen los extremos de un rango de posibles estados de la distribución de usos del suelo en la cuenca entre las de 1900 (menos conservador) y las de 1956 (más conservador).

En el capítulo anterior se ha planteado el uso de modelos de circulación climática para proyectar los caudales y picos de los eventos en la cuenca de estudio a lo largo del siglo XXI. Se ha determinado que las series de precipitación del reanálisis no son aptas para la simulación del comportamiento hidrológico de la cuenca de estudio. A pesar de este resultado, se han incluido y comparado las series de reanálisis con las series VRM con el fin de discutir la representatividad y las limitaciones de las simulaciones basadas en datos de circulación atmosférica (Figura 6.13, Figura 6.14).

En la Figura 6.13 y la Figura 6.14 se observa que la proximidad de valores de precipitación del reanálisis con los de Murcia no se refleja en los resultados de la simulación hidrológica y de producción de sedimentos. En ambas simulaciones, el resultado del reanálisis subestima en gran medida tanto el volumen de agua como el de sedimento movilizado a lo largo del periodo de simulación, independientemente de los usos del suelo que se consideren. La subestimación de valores de esorrentía y producción de sedimentos no se concentran en un tipo de evento característico, si no que se trata de una reducción generalizada de todos los eventos en todo el

periodo de simulación. Las diferencias en las hidrologías también se detectan en su distribución temporal. La hidrología de las series VRM presentan fluctuaciones importantes en la pendiente de la curva de volumen acumulado. Por el contrario, en las curvas del reanálisis, el aumento de volumen sigue una tendencia constante a lo largo de todo el periodo de simulación. Este resultado concuerda con el aumento de desviación entre las curvas de precipitación de Murcia y la serie 20CR observada anteriormente.

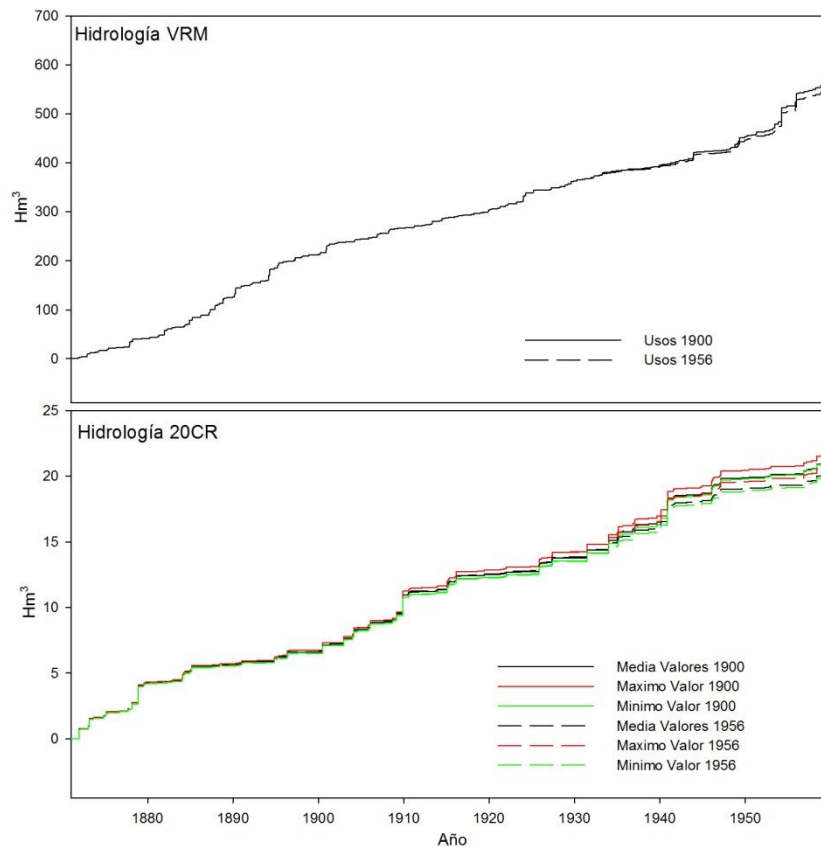


Figura 6.13 Hidrología desde 1871 a 1959, simula por el modelo TETIS-SED considerando los usos del suelo de 1900 en toda la serie (línea continua) los usos de 1956 en el periodo 1931-1959 (línea discontinua), utilizando las series de precipitación VRM (arriba) y la media, el máximo y el mínimo (de los 56 valores por fecha) del reanálisis 20CR (abajo).

En la Tabla 6.2 se comparan los resultados característicos de de la hidrología y la producción de sedimentos de las dos series reconstruidas en base a los datos de Murcia (la primera sin modificar y la segunda modificada según los registros históricos) y las series provenientes del reanálisis 20CR (media, máximo y mínimo). Se observa que los valores basados en cada una de las series son consistentes entre sí, aunque presentan una diferencia muy significativa entre sus valores absolutos (un orden de magnitud en todos los parámetros). En los resultados referentes a las diferencias entre las series determinadas sobre Murcia frente a las determinadas mediante el reanálisis, se constata que las aproximaciones basadas en la circulación atmosférica no son una buena aproximación al comportamiento de la precipitación, y por extensión, a la hidrología de la cuenca de Valdeinfierno.

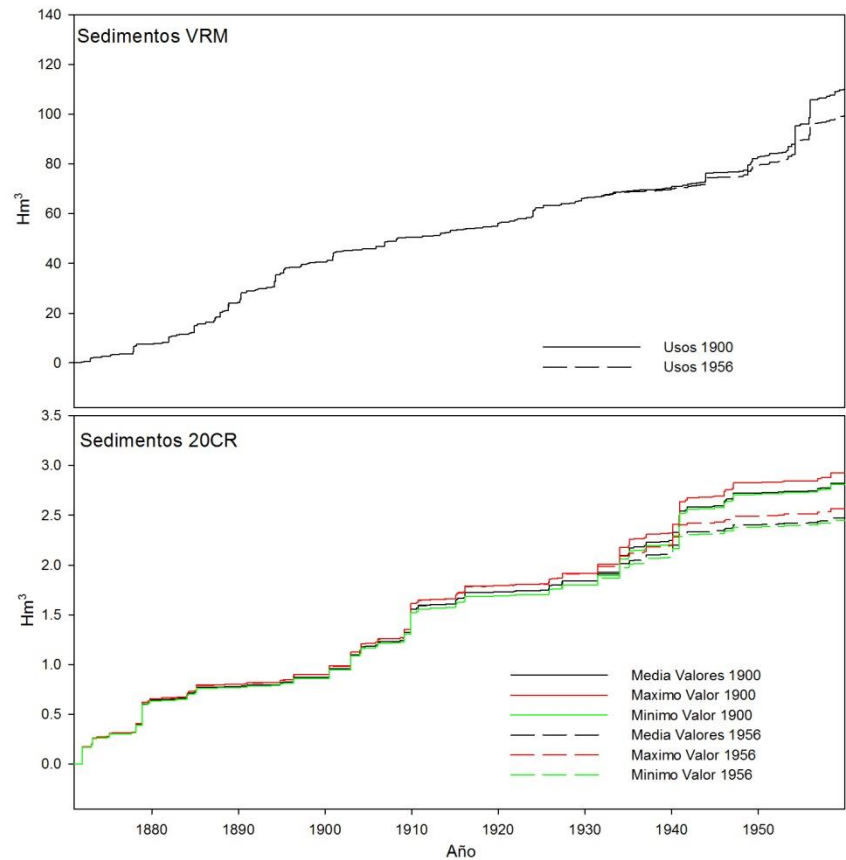


Figura 6.14 Producción de sedimentos desde 1871 a 1959, simula por el modelo TETIS-SED considerando los usos del suelo de 1900 en toda la serie (línea continua) los usos de 1956 en el periodo 1931-1959 (línea discontinua), utilizando las series de precipitación VRM (arriba) y la media, el máximo y el mínimo (de los 56 valores por fecha) del reanálisis 20CR (abajo).

	Series Meteo.	Hidrología			Transporte de sedimentos			
		Q max (m³/s)	V Acum (Hm³)	V medio anual (Hm³/año)	Q max (m³/s)	V.Acum (Hm³)	V medio anual (Hm³/año)	Erosión Anual (t/Ha)
Usos 1900	VRM	181.89	563.34	6.33	77.02	109.94	1.24	29.66
	VHRM	208.23	527.50	5.93	119.68	104.17	1.17	28.11
	20CR_med	22.84	26.15	0.29	8.82	4.83	0.05	1.30
	20CR_max	23.13	26.80	0.30	8.98	4.95	0.06	1.34
	20CR_min	22.74	26.06	0.29	8.81	4.81	0.05	1.30
Usos 1956	VRM	171.48	548.76	6.17	50.58	99.16	1.11	26.76
	VHRM	208.23	513.17	5.77	119.68	98.10	1.10	26.47
	20CR_med	22.84	24.46	0.27	8.82	3.96	0.04	1.07
	20CR_max	23.13	25.09	0.28	8.98	4.06	0.05	1.10
	20CR_min	22.68	24.35	0.27	8.73	3.93	0.04	1.06

Tabla 6.2: Caudal máximo, volumen acumulado, media de aporte anual y erosión media anual en la cuenca de Valdeinfierno en función de las series VRM, VHRM y la media, el máximo y el mínimo de 20CR, en el periodo 1871- 1959, considerando en el intervalo 1931-1959 los usos del suelo de 1900 (arriba) y 1956 (abajo).

La Tabla 6.2, indica que los valores de la hidrología y el transporte de sedimentos entre las series VRM y VHRM son mucho más próximos entre ellas que respecto a las del reanálisis, aunque no coinciden ni en el caudal máximo ni en el volumen. Debido a que la comparación en dicha tabla está limitada por la extensión temporal del reanálisis 20CR, se han recalculado

los parámetros característicos de las dos series (VRM y VHRM), a lo largo de todo su intervalo temporal (Tabla 7.1) (Figura 6.15).

	Series Meteo.	Hidrología			Transporte de sedimentos			
		Q max (m³/s)	V Acum (Hm³)	V medio anual (Hm³/año)	Q max (m³/s)	V Acum (Hm³)	V medio anual (Hm³/año)	Erosión Anual (t/ha)
Usos	VRM	181.89	727.93	6.74	77.02	145.32	1.35	32.31
1900	VHRM	208.23	663.22	6.14	119.68	131.41	1.22	29.21
Usos	VRM	171.48	713.34	6.61	50.58	134.54	1.25	29.91
1956	VHRM	208.23	648.74	6.01	119.68	125.22	1.16	27.84

Tabla 6.3: Resultados de caudal máximo, volumen acumulado, media de aporte anual al embalse de Valdeinfierno y erosión media anual en la cuenca, en el intervalo 1863-1970, considerando en el intervalo 1961-1970 los usos del suelo de 1900 (arriba) y de 1956 (abajo), para la hidrología y el transporte de sedimentos de las series VRM y VHRM.

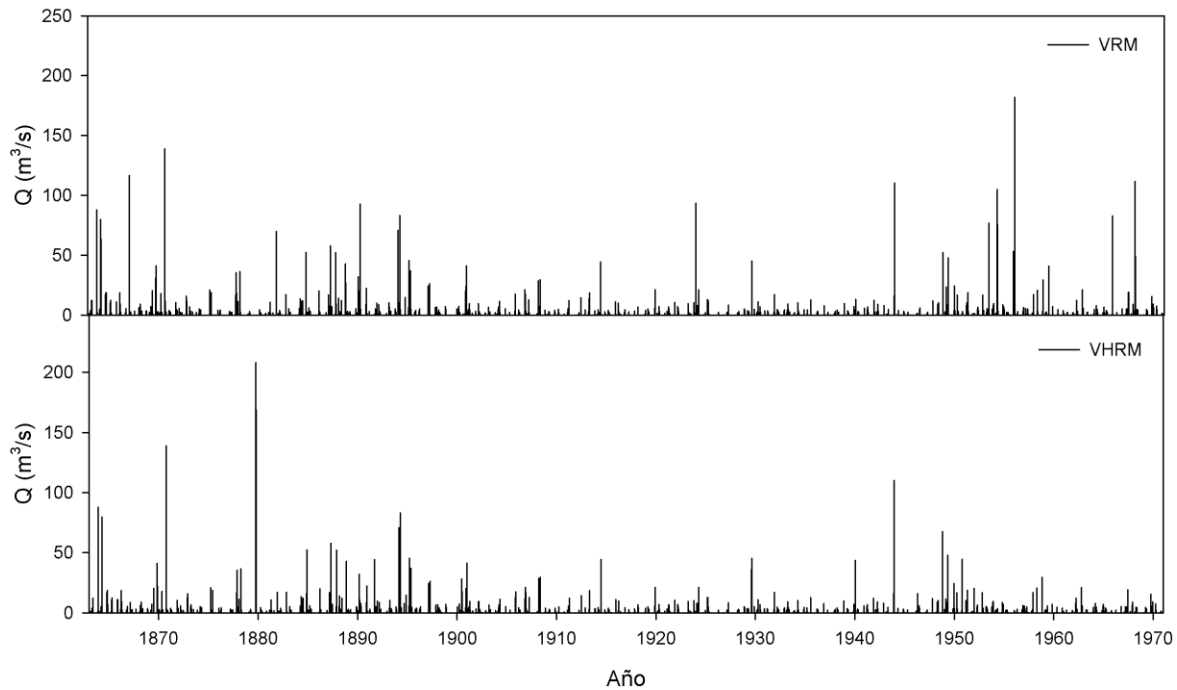


Figura 6.15 Comparación de los caudales máximos anuales simulados con el modelo TETIS-SED en base a las series de precipitación VRM (arriba) y VHRM (abajo), considerando los usos del suelo de 1900 para el intervalo 1961-1970.

Los resultados de la Tabla 7.1 indican que el evento que genera mayor caudal se encuentra en la serie VHRM, aunque el mayor volumen transportado tanto en la hidrología como en los sedimentos se encuentra en la serie VRM. La comparación de estos parámetros con los de la Tabla 6.2 indica que la relación entre los extremos y volúmenes de las series se mantiene, aunque las diferencias en el intervalo más restringido (1871-1959) son menores (Tabla 6.2). Este resultado indica que la ampliación de la serie temporal considerada afecta más a la serie VRM que a la serie VHRM, tal y como se observa la Figura 6.15. En esta figura se identifica que en los dos intervalos omitidos en la Tabla 6.2 (1863-1870 y 1959-1970) se concentran un mayor número de eventos para la serie VRM que para la serie VHRM. Estos eventos son principalmente de magnitud intermedia (alrededor de 50m³/s) y elevada (por encima de

70m³/s), lo que explica el mayor volumen acumulado en la serie VRM. Independientemente de las diferencias entre ellos, se observa que en ambos hidrogramas la mayor densidad de picos se escorrentía se concentra en los periodos entre 1863-1900, y 1940-1960 (prolongado hasta 1970 en la serie VRM).

La erosión en la cuenca presenta valores medios anuales de entre 27.81 y 32.31 t/Ha en función de las distintas series y usos considerados (desde 1863). Estos valores concuerdan con la tasa de erosión anual obtenida en el periodo instrumental en el intervalo 1971-1976 (38.03 t/Ha, Capítulo 4) Desde un punto de vista cuantitativo, las magnitudes de las series VRM y VHRM presentan valores característicos similares. Sin embargo presentan divergencias importantes en la distribución temporal de los grandes eventos. La falta de correlación en la ocurrencia de eventos hace necesario comprobar que la hidrología resultante de la serie VHRM sea representativa de los datos de volumen en Puentes utilizados para su estimación. La estimación de la distribución y la magnitud de los eventos ha sido elaborada directamente sobre la serie de Valdeinfierno corregida mediante la anomalía de escala sobre la de Puentes (VRP). Por este motivo se han comparado los volúmenes mensuales de esta serie VRP con los acumulados mensuales de las series VRM y VHRM (Figura 6.16).

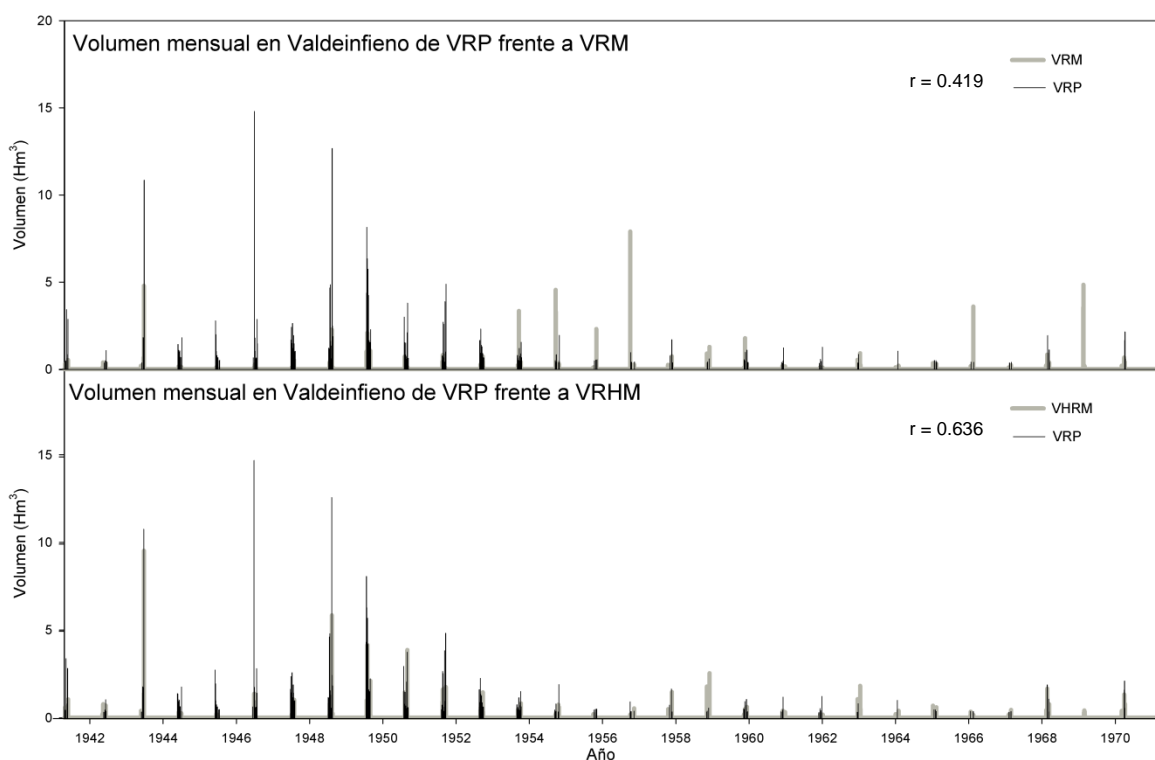


Figura 6.16 Comparación del volumen mensual de agua acumulado en Valdeinfierno, resultante de la simulación del TETIS utilizando las series VRM (arriba) y VHRM (abajo), frente a la serie mensual reconstruida respecto a la serie de puentes (VRP), desde 1942 a 1970

En la Figura 6.16 se observa una correspondencia mucho mayor entre la hidrología de las series entre VHRM y VRP (Pearson=0.636), que entre las series VRP y VRM (Pearson=0.419). La significativa ausencia del extremo reflejado en VRP en el periodo 1946-1947, se debe al uso de los datos discontinuos de las series en las estaciones de Valdeinfierno en la reconstrucción de la precipitación. Los valores instrumentales presentes en dicho intervalo no denotan la presencia del evento, y por consiguiente no se ha considerado. Con la excepción de este evento extraordinario, el ajuste entre el volumen mensual que llega a Valdeinfierno de la serie VHRM frente al determinado utilizando los datos de Puentes, indica que la aproximación a la hidrología utilizando las series VHRM a lo largo del periodo 1863-1970 es representativa del comportamiento real de la cuenca. Otro resultado observable en la Figura 6.16, es la presencia de un periodo de mayor aporte al embalse de Valdeinfierno en el periodo 1940-1950, coincidiendo con los resultados presentados en la Figura 6.15.

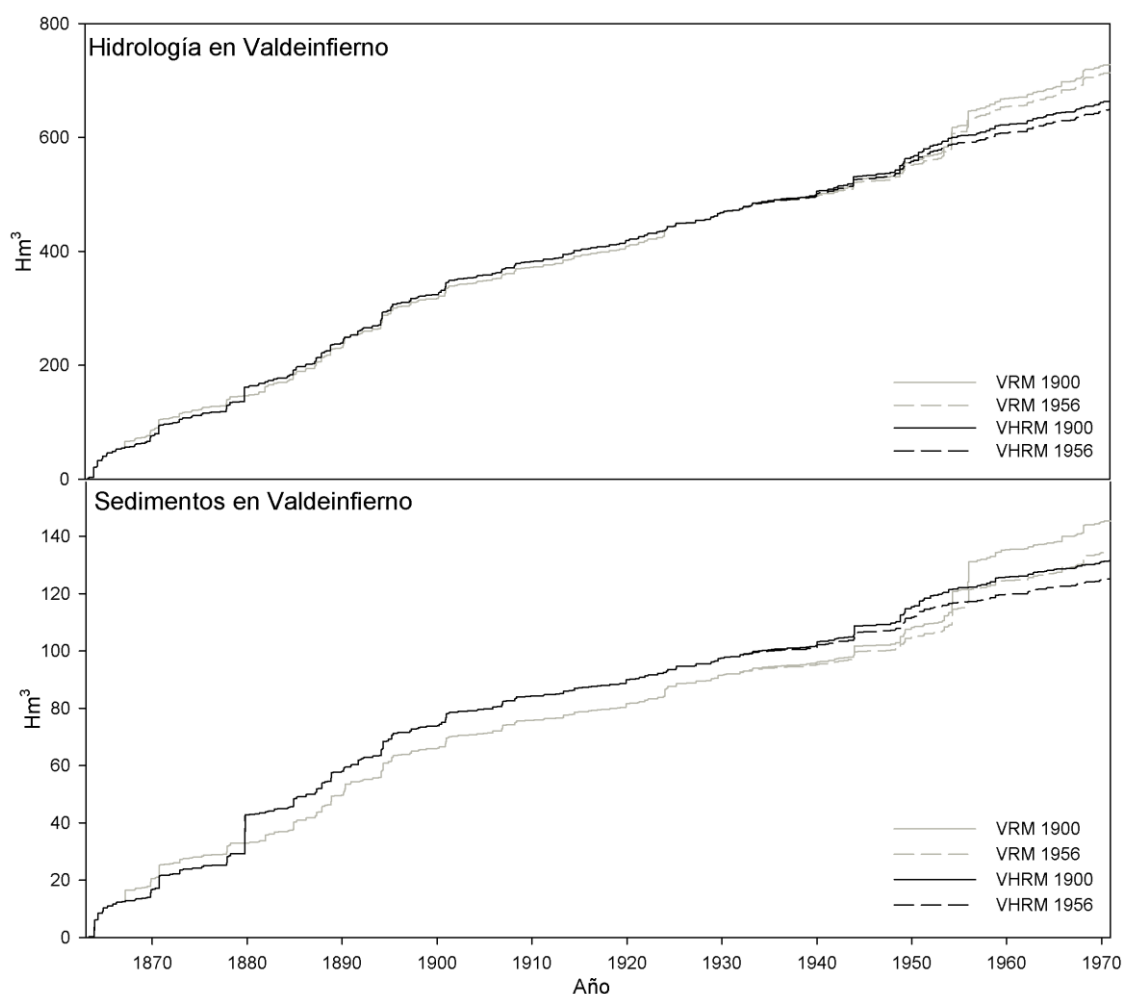


Figura 6.17 Comparación del volumen hídrico (arriba) y de sedimentos (abajo) acumulados en Valdeinfierno en el periodo 1863- 1970, simulados por el TETIS-SED, considerando los usos del suelo de 1900 (línea continua) y los usos del suelo de 1956 (línea discontinua) en el intervalo 1961-1970, considerando las series VRM (gris) y VHRM (negro).

Con el objetivo de analizar y discutir las tendencias de las series VRM y VHRM a lo largo de todo el periodo simulado se han determinado las curvas de volumen acumulado de agua y de sedimento a lo largo de todo el periodo 1863-1970. En dichas curvas también se han representado las diferencias acumuladas entre las dos series, considerando las configuraciones de usos del suelo de 1900 y de 1956.

Los resultados de las curvas de volumen acumulado se exponen en la Figura 6.17. En esta figura, se observa que para todas las series existe una progresiva pérdida de pendiente de las curvas acumuladas, que presenta una ligera variación de pendiente en la parte final, más acentuada en el volumen de sedimento. Esta pérdida de pendiente indica la progresiva reducción de eventos en la cuenca de estudio desde 1900 hasta 1970, con su correspondiente reducción de los recursos hídricos de la zona.

Comparando las series VRM y VHRM se identifica que sus principales discordancias se producen en los intervalos en los que se han modificado los eventos extremos de la serie VRM con los datos regionales e históricos. Esta diferencia es mucho más significativa en la producción de sedimentos que en la hidrología, existiendo cambios importantes entre las dos curvas a partir del primer extremo hidrológico de cierta importancia (siendo el máximo exponente el evento de 1879, por tratarse del evento mayor de todo el periodo, no reflejado en Murcia). Estos resultados indican una mayor sensibilidad de la erosión a los cambios de usos del suelo frente a la hidrología, lo que concuerda con lo que se ha observado en capítulos anteriores.

Los resultados de la Figura 6.13, la Tabla 6.2 y la Tabla 7.1 ponen en relieve que las principales diferencias entre la hidrología de VRM y VHRM se presentan en la parte final de las series, donde existe mayor información instrumental. Estas diferencias se producen por el hecho de que en la parte final de las series se ha podido adaptar mejor la precipitación a los registros de eventos históricos (principalmente los datos del embalse de Puentes).

Respecto a la configuración de los suelos más adecuada para la simulación, no se ha podido definir cuál de las dos distribuciones planteadas (1900 o 1956) es más representativa del comportamiento de la cuenca. Por un lado, el periodo 1931-1960 solapa el de los usos de 1956. Por otro, según las referencias históricas (Montiel Pinilla, 1953), a mediados de los años 1950 no se habían implementado medidas de mitigación y reforestación en la cuenca. Debido a esta divergencia entre fuentes de información no es posible definir cuáles de los usos del suelo son más indicados en la simulación de periodo 1930-1960. Lo más probable es que la configuración real se encontrase en un punto intermedio entre las dos, por la propia evolución de las zonas naturales y los campos abandonados en la cuenca. La diferencia entre ambas configuraciones está magnificada por el hecho de que el intervalo 1930-1960 sea un periodo con una de las concentraciones de eventos extraordinarios más altas detectado en toda la serie temporal.

6.3.1. Hidrología histórica y su producción de sedimentos en Valdeinfierno entre los siglos XIX y XX en el contexto de cambio climático y ambiental

La reconstrucción de las condiciones en las que se han generado los grandes eventos de escorrentía y erosión en la cuenca de Valdeinfierno desde la segunda mitad del siglo XIX hasta la actualidad ha permitido estimar el comportamiento de la cuenca durante dicho periodo, evaluar su correspondencia con los distintos planteamientos de aproximación a la climatología, y comparar los resultados de las distintas metodologías entre sí y con registros históricos.

En gran parte del área Mediterránea la climatología está fuertemente determinada por condiciones locales como la orografía, y presenta grandes cambios en distancias relativamente reducidas (Hidalgo-Munoz et al., 2011). En zonas donde estas condiciones locales son especialmente determinantes se puede identificar una divergencia importante entre la reconstrucción de los eventos de precipitación utilizando series dependientes de circulación atmosférica (reanálisis) y utilizando series de datos regionales (Jacob et al., 2007). La falta de correlación puede llegar al extremo de presentar tendencias de precipitación inversas entre los datos dependientes de condiciones globales y los dependientes de condiciones regionales (Christensen y Lettenmaier, 2007). La falta de correspondencia entre los datos regionales y los datos de reanálisis es crítica en los extremos de precipitación de los que dependen los eventos extraordinarios. Esto se debe a que a menudo la distribución espacial de este tipo de eventos es muy reducida y dependiente de fenómenos locales, más que de tendencias globales (Goodess y Jones, 2002; Herrera et al., 2010). El comportamiento local del fenómeno compromete la fiabilidad de las modelizaciones (tanto reconstrucciones meteorológicas como modelos hidrológicos) considerando estimaciones en base a circulación global (Gomez-Navarro et al., 2011). El factor de escala entre la información local y la global no se refleja en la temperatura. La temperatura depende en menor medida de las condiciones regionales que la precipitación (Kostopoulou y Jones, 2007), y puede ser reconstruida y simulada eficazmente mediante datos y modelos de circulación global y regional (Alexander et al., 2006; Christensen et al., 2007).

En la cuenca de Valdeinfierno se ha observado una importante falta de correspondencia de las variables determinadas utilizando series climáticas de circulación global (reanálisis) y datos instrumentales. A su vez, se ha determinado que la cobertura temporal del reanálisis 20CR es inferior a la de las series de datos reconstruidos a partir de datos regionales. Estos dos factores principales han llevado a considerar que la mejor aproximación a la simulación del comportamiento de la hidrología y la producción de sedimentos en la cuenca de Valdeinfierno a lo largo de la última mitad del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX son las series de datos reconstruidos a partir de información regional y/o local. La aproximación regional a la hidrología en Valdeinfierno evidencia la magnitud de los eventos extremos ocurridos a lo largo de los últimos 150 años. Dichos fenómenos son parecidos a los de mayor magnitud registrados en las estaciones de medida de la cuenca durante el periodo instrumental (1971-2012), aunque presentan una frecuencia de ocurrencia mucho mayor que en la actualidad (Gil Olcina, 1968;

López-Bermúdez et al., 1978), lo que concuerda con las tendencias en la precipitación determinadas a nivel Mediterráneo (Ramos, 2001; Xoplaki et al., 2004) y en la Península Ibérica (Ramos, 2001; del Rio et al., 2011). La concentración de eventos extremos y erosión en la cuenca no es homogénea a lo largo de todo el periodo simulado. Se observa que la mayor densidad de eventos en la serie se concentra en la última parte del siglo XIX (1863-1900). Este resultado ha sido observado en otros estudios en el área (Benito et al., 2010; Machado et al., 2011) y concuerda con el periodo comprendido entre la parte final de la pequeña edad de Hielo (LIA) y el inicio del siglo XX en el que se produce un aumento importante (rápido) en las temperaturas (IPCC, 2013) y en la frecuencia de precipitaciones extremas (Knox, 2000; Corella et al., 2014). Se puede considerar que ambos parámetros están relacionados debido a que los periodos con cambio climático rápido conllevan inestabilidad climática (Trouet et al., 2012). Por consiguiente, la concentración en un periodo determinado de eventos extraordinarios de precipitación puede ser indicativo de un periodo de cambio rápido del clima (Macklin et al., 2006). En la última parte del periodo simulado (~1945-1970), se ha determinado un aumento de la frecuencia de eventos extraordinarios. Según lo expuesto anteriormente, este aumento puede ser indicativo de una nueva inestabilidad climática asociada a un rápido ascenso de las temperaturas de acuerdo con los resultados del quinto informe del IPCC (AR5; IPCC, 2013).

Respecto a la gestión de los suelos, las técnicas de cultivo de la época no contemplaban la conservación del suelo, implementándose técnicas de cultivo como la tala y quema, en gran parte del territorio nacional (Lasanta, 1989). Éste factor sumado a la alta presión demográfica en el ambiente rural que inducía a la ocupación agrícola de laderas con pendientes elevadas (García-Ruiz y López Bermúdez, 2009) favoreció una elevada erosión en la zona de estudio a mediados del siglo XIX. A finales del siglo XIX se inicia un fenómeno de abandono masivo de las áreas rurales frente a las urbanas, generalizado a todo el territorio Español (Cerdà et al., 2012; Revuelto, 2012). Del mismo modo que en capítulos anteriores, y de acuerdo con los resultados de García-Ruiz (2010), se constata que en periodos prolongados de tiempo, el abandono de campos supone un aumento de la vegetación natural (Ruiz-Flaño et al., 1992), y por consiguiente, una reducción en la erosión (Puigdefabregas et al., 1999).

Las clasificaciones de usos del suelo utilizadas en la modelización de la hidrología y la producción de sedimentos, se han basado en los usos del suelo actuales considerando los ciclos y técnicas de cultivo modernos. Este hecho hace que teniendo en cuenta la gestión del suelo de la época, la configuración utilizada resulte una aproximación conservadora durante la primera parte de la simulación. En la segunda parte de la modelización, el abandono prolongado de cultivos hace que los usos del suelo de 1900 supongan una aproximación más desfavorable que la situación real. No obstante, este periodo se ha simulado con los usos del suelo de 1900 y de 1956. Esta última configuración es más conservadora que cualquiera de las posibles distribuciones del terreno a lo largo del periodo y, por lo tanto, cualquier esquema de usos del suelo de principios del siglo XX se encuentra contenido en el rango determinado por los usos 1900 y 1956.

Las tasas de erosión media anual obtenidas en la cuenca de Valdeinfierno muestran valores alrededor de 30 t/Ha. Estos valores son equivalentes a los obtenidos en el capítulo 4 en presencia de eventos extremos, y acordes con otros resultados obtenidos en la región (Chaparro y Esteve, 1995; Lesschen et al., 2008), encontrándose de los rangos considerados como zonas de erosión acelerada en la Región de Murcia por Romero-Díaz et al. (2011).

Queda demostrado que las dinámicas hidrológicas y especialmente de erosión de la cuenca de Valdeinfierno, es muy susceptible a las variaciones climáticas y de usos del suelo. Desde un punto de vista climático, la información disponible de los siglos XIX y XX aplicada en la cuenca de estudio, indica que su comportamiento está fuertemente condicionado por la dinámica climática local, aunque también puede responder a cambios de carácter global. La distribución de los usos de los suelos, en el periodo en el que se centra el presente capítulo, se corresponden a una progresiva despoblación y abandono del área que favorece una mayor conservación del suelo a largo plazo, reduciendo paulatinamente sus tasas de erosión. La posibilidad de definir el comportamiento de una cuenca en el pasado contrastable con los registros históricos y naturales, supone una valiosa herramienta para entender su comportamiento presente, y discutir con mayor solidez las tendencias hacia el futuro.

6.4. Conclusiones

Las series de volumen transportado en la hidrología y el sedimento calculadas mediante datos regionales son consistentes entre sí, al igual que las calculadas mediante reanálisis, pero entre unas y otras existe una diferencia significativa de hasta un orden de magnitud.

La simulación ligada a la precipitación determinada por reanálisis no es una buena aproximación al comportamiento de la hidrología en la cuenca de Valdeinfierno. Los resultados de la técnica subestiman en gran medida el volumen de agua y de sedimento movilizado a lo largo del periodo de simulación, tanto en magnitud como en distribución temporal, independientemente de los usos del suelo que se consideren.

El uso de series meteorológicas regionales para la reconstrucción de la hidrología de una cuenca permite determinar la respuesta hidrológica de dicha cuenca en magnitud, pero no la distribución temporal de los eventos. Para este fin, es necesario corregir y contrastar los datos de las series utilizando los documentos históricos y los registros disponibles (testimonios documentados, series instrumentales y registros naturales).

Las diferencias entre series meteorológicas determinadas utilizando datos de distintas fuentes, se magnifican en presencia de los eventos de mayor magnitud, y de forma mucho más significativa en el transporte de sedimentos que en la hidrología.

La mayor acumulación de extremos hidrológicos y de transporte de sedimentos de todo el registro disponible en Valdeinfierno se produce entre la segunda mitad del siglo XIX y principios del siglo XX, con máximos entre los periodos 1863 y 1900, y entre 1945 y 1970. Estos periodos coinciden con intervalos de inestabilidad hidrológica (aumento en la frecuencia de extremos) derivada de reajustes en la atmósfera durante los que se observan importantes aumentos de la temperatura global en cortos espacios de tiempo.

La erosión anual media en la cuenca es equivalente a la tasa de erosión obtenida en el intervalo con el mayor evento registrado en el periodo instrumental (1971-1976). El abandono de campos y las técnicas agrícolas utilizadas para el cultivo en los campos puede ser determinante en las tasas erosión.

La variabilidad de los usos del suelo dentro de la misma serie afecta en mayor medida a la generación y transporte de los sedimentos que en la hidrología, en línea con lo que se ha observado en capítulos anteriores.

El comportamiento de la cuenca a lo largo de la segunda mitad del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX permite entender sus dinámicas hidrológicas y sedimentarias presentes, y determinar con mayor rango de información las limitaciones de las futuras tendencias de la cuenca en función de los distintos escenarios de cambio global.

Capítulo 7: Síntesis, discusión y conclusiones

Introducción

A lo largo de esta tesis doctoral, se han planteado distintas aproximaciones a la hidrología, la erosión y el transporte de sedimentos en la cuenca de Valdeinfierno. Estas variables no son independientes entre ellas, así como tampoco lo son sus periodos temporales. El presente capítulo pretende ligar y sintetizar los resultados obtenidos, presentando una visión global de la cuenca, desde que se tiene información de los procesos que en ella ocurren (principios del Holoceno), hasta las proyecciones de su comportamiento a finales del siglo XXI. Esta visión global pretende determinar la dinámica hidrológica y sedimentaria a lo largo de la historia y de este modo entender mejor las tendencias y limitaciones de las proyecciones futuras y los modelos utilizados para su cálculo.

Los objetivos concretos de este capítulo son:

- Exponer las tendencias observadas y proyectadas en la cuenca a resolución diaria, anual, decenal y centenaria
- Discutir las limitaciones de las técnicas de aproximación y los modelos utilizados para definir la hidrología y el transporte de sedimento en la reconstrucción del pasado y la proyección hacia el futuro.
- Contextualizar el comportamiento actual y proyectado de la Hidrología de la cuenca, respecto a las dinámicas observadas en esta a lo largo del Holoceno.

7.1. Comportamiento hidrológico y sedimentario de la cuenca de estudio.

La hidrología y el transporte de sedimentos en la cuenca de Valdeinfierno presentan cambios significativos en el tiempo, dependiendo de múltiples variables entre las que destacan los usos del suelo y el clima. En los capítulos 4, 5 y 6 se ha determinado la respuesta hidrológica de la cuenca de estudio a lo largo de distintos intervalos temporales: (a) 1971-2012, periodo instrumental, capítulo 4; (b) 2010-2099, periodo proyectado, capítulo 5; (c) 1863-1970, periodo reconstruido, capítulo 6. Los resultados de cada uno de los capítulos no ha sido interrelacionado con los demás, por lo que se considera necesario elaborar una concatenación entre las series de resultados. En definitiva se pretende considerar el efecto combinado de todos los intervalos de simulación y todas las posibles configuraciones de variaciones climáticas y usos y gestión del suelo.

En el presente apartado se han sintetizado todos los resultados obtenidos a lo largo de los capítulos anteriores, en función de las distintas aproximaciones temporales y de usos del suelo de la cuenca de estudio obtenidos mediante el modelo TETIS-SED. Concretamente, se han correlacionado los resultados de las simulaciones hidrológicas y la producción de sedimentos determinadas desde el siglo XIX al XXI. Estos resultados obtenidos en periodo reciente (~150 años hacia el pasado y ~90 hacia el futuro), se han contrastado cualitativamente las distintas tendencias observadas en la cuenca a mayor escala temporal (Holoceno), definiendo así el estadio de la cuenca dentro de un contexto más extenso de cambios climáticos y ambientales. Esta comparación se desarrolla en el apartado de la discusión integrada, debido a su carácter cualitativo (7.2)

El análisis de la respuesta hidrológica y del transporte de sedimentos en la cuenca de Valdeinfierno a lo largo del periodo reciente (1863-2099), se ha determinado compilando los resultados de los capítulos 4, 5 y 6. El rango de resultados de las distintas aproximaciones se ha determinado escogiendo la combinación clima-usos del suelo que generan la mayor y menor escorrentía, y la mayor y menor producción de sedimentos respectivamente. Esta diferenciación se ha determinado en cada uno de los intervalos considerados. Los caudales y la producción de sedimentos diario resultantes de la combinación de los tres intervalos considerados, se presentan en la Figura 7.1.

Respecto a la hidrología, en la Figura 7.1 se puede apreciar una importante reducción en la frecuencia de eventos entre el periodo reconstruido y el periodo instrumental, y otra menos significativa entre este último y el periodo proyectado. La misma tendencia se repite en la magnitud de los caudales extremos e intermedios, y en la del evento máximo de cada intervalo, aunque las diferencias en este último caso son menores.

Respecto al sedimento transportado, se observa que la variación de la frecuencia de eventos extraordinarios entre los periodos reconstruido e instrumental es mucho mayor que en la

hidrología, mientras que entre el periodo instrumental y el proyectado se reduce. Dicha reducción se acentúa en la magnitud de todos los extremos de transporte de sedimento para los distintos intervalos, potenciada por las diferencias en los usos y gestión de los suelos.

Los eventos de mayor caudal en el periodo de proyección (Figura 7.1) no concuerdan con los de transporte máximo de sedimentos (ni en periodo de ocurrencia ni en magnitud). Esta discordancia se debe a que, de acuerdo con el capítulo 5, las condiciones de usos de suelo, clima y período de ocurrencia del evento máximo que generan el caudal y el transporte de sedimentos, no coinciden entre el máximo y el mínimo.

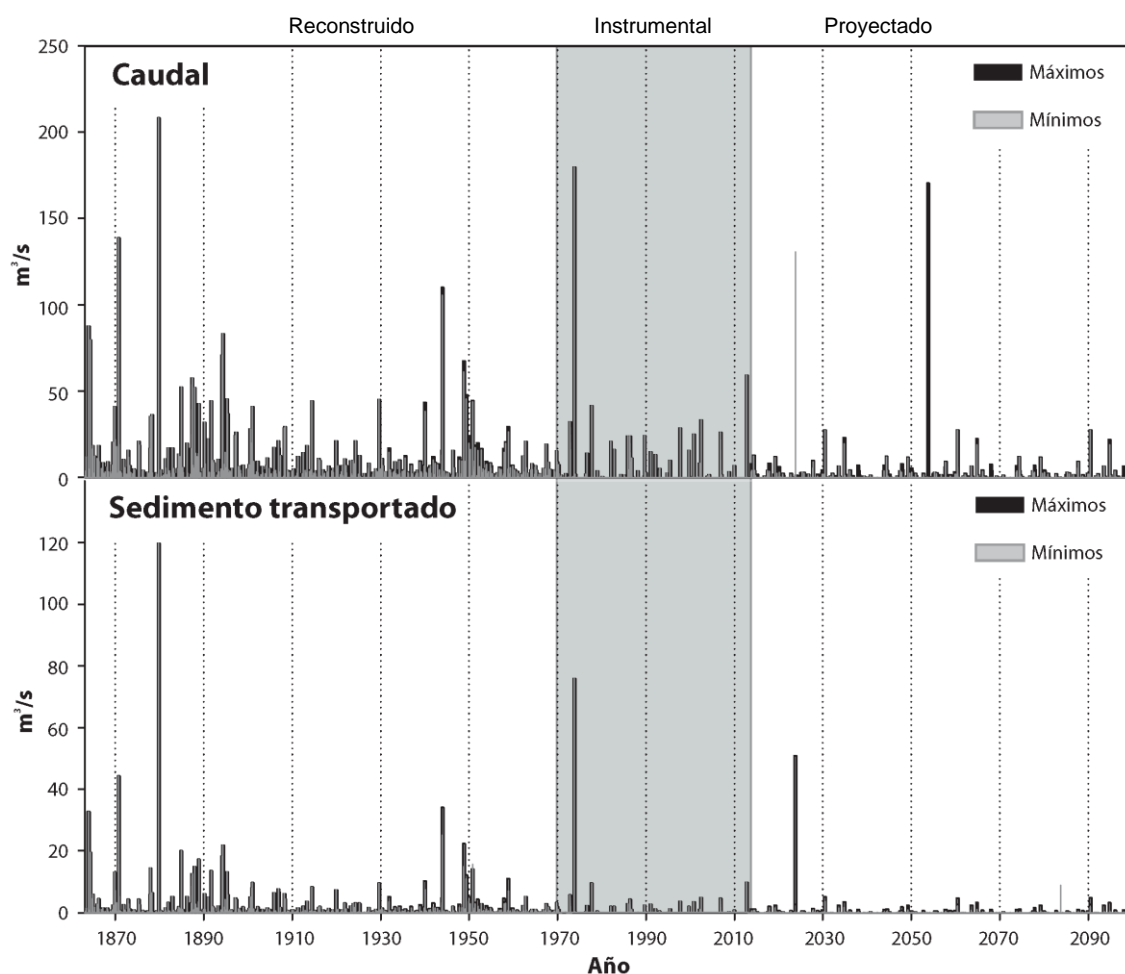


Figura 7.1 Hidrograma y caudal de sedimento diario calculados y estimados en la presa de Valdeinfierno entre 1863 y 2099, considerando los usos y los escenarios climáticos cuyos caudales son máximos (columnas en negro) y mínimos (columnas en gris).

La progresiva reducción de los caudales generados en la cuenca (reducción de precipitación por variación climática) combinada con los cambios producidos en los usos del suelo, conlleva una rápida reducción de las tasas de erosión en la cuenca de Valdeinfierno. No obstante esta reducción no inhibe la presencia de eventos extraordinarios de gran magnitud a los que va asociado un fuerte potencial erosivo.

El caudal y transporte de sedimentos diarios, permiten determinar el efecto sobre los procesos hídricos de las distintas consideraciones de reconstrucción y proyección de la cuenca de estudio a escala diaria. No obstante, no son una herramienta adecuada para determinar las tendencias generales y las relaciones interanuales y decenales en la hidrología y el transporte de sedimentos. Con el objetivo de determinar este tipo de variaciones a mayor escala temporal, se ha elaborado las curvas de volumen de agua y de sedimentos aportados al embalse de Valdeinfierno a lo largo de todo el periodo de simulación (1863-2099) (Figura 7.2).

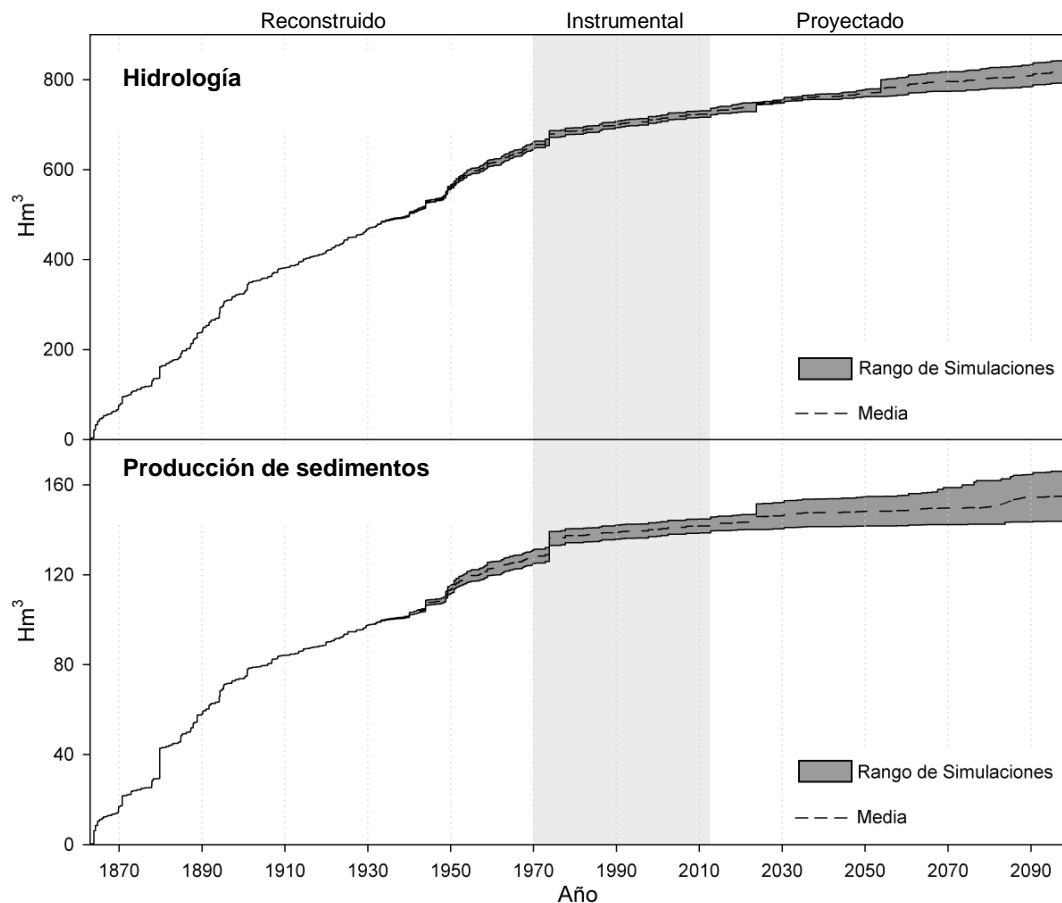


Figura 7.2 Volumen de transporte de agua y sedimentos en la presa de Valdeinfierno entre 1863 y 2099, considerando el rango (sombreado gris oscuro) y la media (línea discontinua) del resultado de las distintas simulaciones en función de las configuraciones de usos del suelo y los escenarios climáticos.

La separación entre curvas observado en la Figura 7.2, se corresponde con los valores envolventes máximos y mínimos de los volúmenes de transporte hasta el embalse. Esta separación de curvas se inicia con la diferente consideración de los usos del suelo en el periodo reconstruido (intervalo 1930-1960 con los usos de 1900 o 1956, capítulo 6), se mantiene a lo largo del periodo instrumental, y se amplía en función de las diversas combinaciones de usos del suelo-clima considerados en el periodo proyectado. Se constata que la separación entre las dos curvas envolventes es mayor en la producción de sedimentos que en el volumen de agua, maximizándose el transporte en los picos. Este resultado confirma las observaciones realizadas en el capítulo 5 en donde se afirma que la producción de sedimentos en la cuenca de Valdeinfierno es más susceptible a los cambios ambientales que en la hidrología (e.g. clima).

En la Figura 7.2 también se puede observar que independientemente de los escenarios y usos considerados, el volumen de agua y sedimento transportados hasta el embalse de Valdeinfierno tiende a reducirse en el tiempo. De este modo, el periodo reconstruido consiste en el de mayor aporte de volumen de agua y sedimento de toda la serie. Se observa que dentro de dicho periodo la pendiente media de las curvas es la más elevada de toda la serie, aunque los intervalos con mayor aumento de volumen transportado se concentran entre 1863 y 1900, y alrededor de 1945 y 1970, de acuerdo con los resultados del capítulo 6.

Comparando la Figura 7.1 y la Figura 7.2 se determina que los intervalos en los que hay una mayor concentración de eventos moderados y grandes, coinciden con los intervalos de mayor pendiente en las curvas de volumen de transporte. Este resultado relativiza la presencia/ausencia de picos extraordinarios puesto que tanto en la hidrología como en el sedimento, el volumen transportado durante el periodo reconstruido es mayor que el transportado durante la unión de los otros dos periodos (a pesar de que contienen dos de los tres eventos de mayor magnitud de toda la simulación).

Los valores característicos de la hidrología y la producción de sedimentos en la cuenca de Valdeinfierno desde mediados del siglo XIX hasta finales del siglo XXI, se exponen en la Tabla 7.1. Los resultados se han separado en función de cada uno de los periodos considerados (reconstruido [1863-1970], instrumental [1971-2012] y proyectado [2012-2099]) y los resultados globales de toda la simulación (1863-2099).

Intervalo	Magnitud	Hidrología			Sedimento		
		Evento extremo (m³/s)	Volumen acumulado (Hm³)	Volumen medio anual (Hm³)	Evento extremo (m³/s)	Volumen acumulado (Hm³)	Erosión anual (t/ha)
1863-1970	Máxima	208.23	663.22	6.14	119.68	131.41	29.21
	Mínima	208.23	648.71	6.01	119.68	125.22	27.84
	Media	208.23	655.96	6.07	119.68	128.31	28.53
1971-2012	Máxima	179.96	77.25	1.74	75.95	14.30	8.17
	Mínima	179.96	77.25	1.74	75.95	14.30	8.17
	Media	179.96	77.25	1.74	75.95	14.30	8.17
2013-2099	Máxima	175.11	115.45	1.23	50.87	20.41	5.63
	Mínima	128.24	70.44	0.81	7.70	4.37	1.21
	Media	151.67	92.95	1.02	29.28	12.39	3.42
Global	Máxima	208.23	843.42	3.62	119.68	166.11	17.12
	Mínima	208.23	792.43	3.40	119.68	143.88	14.83
	Media	208.23	817.92	3.51	119.68	155.00	15.97

Tabla 7.1: Valores de evento extremo, volumen acumulado, media de aporte anual al embalse de Valdeinfierno y erosión media anual en la cuenca, en los intervalos 1863-1970, 1971-2012, 2013-2099 y global (1863-2099).

La Tabla 7.1, muestra una reducción en el tiempo de los caudales hidrológicos, el sedimento transportado y la erosión en la cuenca. Se observa que la reducción en los aportes de agua y de sedimento es mucho más marcada en la primera parte de la serie (entre el periodo reconstruido y el instrumental), que en la segunda parte (entre el periodo instrumental y el periodo proyectado), en línea con los resultados de la Figura 7.1 y la Figura 7.2. Otro resultado que se puede identificar en la tabla es la mayor influencia de los cambios sobre los sedimentos, puesto que las diferencias anuales relativas en la erosión son mayores que en el volumen hidrológico medio.

El volumen de datos de la serie simulada (237 años en datos diarios) y falta de equidad en la duración de cada uno de los periodos (108, 42 y 87 años respectivamente), hace que la comparación de los resultados entre intervalos sea de compleja interpretación (desigualdad de periodos). Los parámetros referentes a la erosión y el volumen hídrico producido anualmente, muestran valores que no son representativos de las variaciones observadas en los datos diarios de la Figura 7.1 y la Figura 7.2. Con el objetivo de poder identificar las tendencias generales los dos parámetros mencionados, se ha subdividido el intervalo de simulación en décadas (a excepción del primer intervalo 1963-1870). En cada década se ha calculado la media anual del volumen de agua transportada hasta el embalse, y de la erosión en la cuenca de estudio. Los resultados del cálculo, conjuntamente con la media anual de ambos parámetros para toda la serie, se presentan en la Figura 7.3.

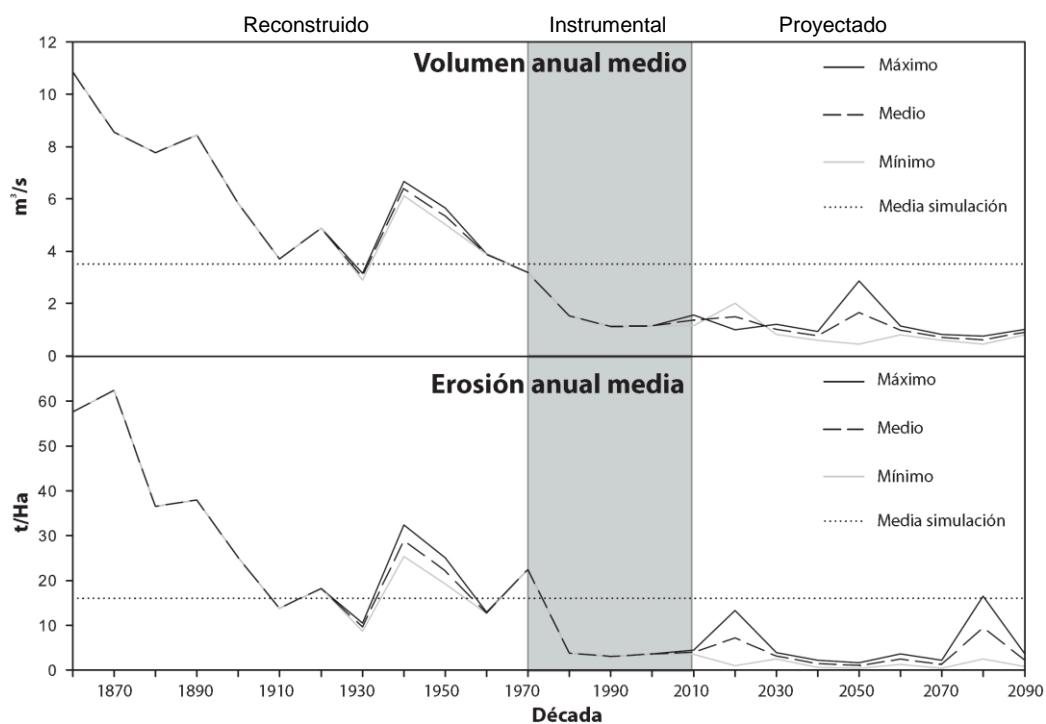


Figura 7.3 Volumen de aporte de agua y erosión media anual de cada década del periodo comprendido entre 1863 y 2099, considerando los valores de erosión y transporte máximos(línea negra), mínimos(línea gris) y medios(línea discontinua).el volumen de agua y la erosión anual media para todo el periodo considerado esta referenciado por la línea punteada.

En la Figura 7.3 se observa que a lo largo del intervalo simulado el volumen de agua y la erosión anual presentan tendencias generales parecidas con ciertas fluctuaciones entre los dos parámetros. Comparando la división que genera la media de toda la simulación con la curva del volumen y la erosión anual en cada década, se constata que la media separa prácticamente a la perfección el intervalo reconstruido, de los intervalos instrumental y proyectado. Este resultado es consistente con las observaciones referentes a las pendientes en la Figura 7.1, e indica que la movilización de agua y sedimento en la cuenca es muy superior entre mediados del siglo XIX y mediados del XX, que entre mediados del XX y finales del XXI.

La Figura 7.3 muestra que la hidrología y el transporte de sedimentos dependen principalmente de los eventos extraordinarios, pero con condicionantes ligeramente distintos entre la hidrología y el transporte de sedimentos. De acuerdo con los resultados de la Figura 7.2, en ambas variables se observa que la frecuencia de los eventos extraordinarios puede ser más determinante que su magnitud (valores 1940-1950 > 1970; con evento de 1973). A pesar de esta afirmación, se observa que los periodos con eventos extraordinarios (Figura 7.1) generan un importante incremento de las tasas de erosión, sin que este se vea reflejado en la hidrología (de acuerdo con la Tabla 7.1 y la Figura 7.2).

Los resultados obtenidos de la comparación de todas las simulaciones implementadas en la cuenca de Valdeinfierno indican que, según las tendencias consideradas, se está produciendo una pérdida progresiva de los recursos hídricos y consecuentemente una reducción en la erosión media. Respecto a los eventos extremos, las simulaciones indican que los eventos extraordinarios de mayor magnitud seguirán produciéndose en la cuenca. En el periodo de proyección, los eventos extraordinarios amplifican su influencia sobre las medias anuales debido a la falta de eventos medios y grandes. Se ha determinado que la proyección de esta clase de eventos presenta una moderada variación en la hidrología, pero genera pulsos (eventos) con una producción de sedimento muy elevada, condicionada por los escenarios de gestión del territorio y los usos del suelo.

Estas tendencias actuales, se asemejan a los periodos de encajamiento detectados a lo largo del Holoceno (capítulo 3) en los que se han determinado periodos de elevada aridez, con un régimen de precipitación escaso y torrencial, asociado con posibles cambios abruptos debidos a crisis climáticas. Estos procesos afectan al régimen hídrico y sedimentario de la cuenca incrementando la erosión frente a la acumulación de sedimentos (menos eventos de magnitudes bajas e intermedias frente al mantenimiento de la frecuencia de los eventos extremos)

7.2. Discusión integrada.

La cuenca alta del río Guadalentín, en la que se incluye Valdeinfierno, responde a un régimen altamente torrencial cuya hidrología está dominada por los eventos extremos que periódicamente se producen en ella (Gil Olcina, 1968). La elevada irregularidad hidrológica se refleja en intensos periodos de sequía que contrastan con enormes avenidas (Masachs Alavedra, 1948). Este comportamiento hidrológico errático dificulta enormemente su estudio tanto desde el punto de vista del riesgo de avenidas como de la estimación realista de los recursos hídricos (Jacob et al., 2007). Los registros Holocenos de la cuenca de estudio han permitido determinar que un comportamiento hidrológico y sedimentario similar al actual se viene produciendo desde los últimos 3000 años. El registro morfo-sedimentario muestra la existencia de periodos pasados, de duración secular y multi-secular, con una elevada frecuencia de los eventos extremos que incrementan considerable la erosión y el aporte sedimentario a los fondos de valle. En

general, estos periodos de actividad hidrológica corresponden a momentos de cambio climático regional (momentos fríos y/o de transición climática), que pueden ser magnificados por la ocupación humana del territorio, particularmente a finales del Bronce-Hierro (3000-2350 años BP), del Periodo Romano (2100-1900 años BP) y en los últimos 150 años.

El modelo hidrológico distribuido utilizado (TETIS-SED) ha demostrado ser una herramienta adecuada a la aproximación de la caracterización de la cuenca de Valdeinfierno, mostrando una precisión de resultados proporcional a la magnitud de los eventos (fiabilidad del modelo mayor, a mayor evento). Sin embargo, los datos del modelo tienen un sesgo a subestimar los resultados de volumen de transporte de sedimento y de caudal (Frances et al., 2007; Bussi et al., 2013). Esta desviación se ha observado y comentado en los resultados y discusiones de los distintos capítulos de esta tesis, e indican que el modelo es conservador en términos de la magnitud de los eventos hidrológicos y la erosión producida en la cuenca. En el caso concreto del transporte de sedimentos, la determinación de la acumulación en los diques de retención en la cuenca mediante técnicas topográficas de alta resolución (TLS y RTK-GPS) ha permitido la calibración del modelo, pudiendo ser validado con las batimetrías realizadas en el embalse de Valdeinfierno, que cierra la cuenca de estudio. Este resultado contradice un número importante de estudios que exponen que un modelo calibrado para simular la erosión a nivel muy local, no es válido para simular el conjunto de la cuenca (Van Rompaey et al., 2001; Renschler y Harbor, 2002; Jetten et al., 2003). En nuestro caso, el modelo distribuido TETIS-SED se ha podido calibrar a partir de datos registrados en diques dispuestos en diferentes subcuencas, lo que conlleva que reajuste del factor de escala y la reducción de los errores derivados del cambio de escala.

El modelo hidrológico distribuido TETIS-SED ha permitido reconstruir el comportamiento hidrológico y sedimentológico de la cuenca, y realizar proyecciones de los cambios futuros en función de diferentes escenarios climáticos y de cambio ambiental. En la cuenca de Valdeinfierno la fuente de datos meteorológicos para el periodo 2010-2100 se han obtenido a partir de un downscaling estadístico sobre el que se aplican las anomalías derivadas de los modelos de cambio climático publicados por el IPCC (2007b) para tres escenarios de emisiones (A2, A1B y B1). Los resultados de las series hidrológicas proyectadas demuestran que se producen cambios en la frecuencia (reducción) y magnitud (aumento) de los eventos extraordinarios, condicionando su aporte hídrico y sus efectos en la erosión a lo largo del siglo XXI. Esta tendencia en la frecuencia y magnitud de los eventos extremos está de acuerdo con los resultados obtenidos para el Mediterráneo occidental por Christensen et al.(2007). Estos resultados de la proyección climática deben ser tomados con precaución debido a que se ha aplicado en modelos de Circulación General de la Atmósfera, y por tanto con una resolución insuficiente como para generar un escenario detallado de los cambios en la hidrología a escala de pequeñas cuencas. Dicha limitación no se presenta en la reconstrucción de la hidrología de la cuenca para periodos anteriores a la serie instrumental disponible. Los registros histórico-documentales y pre-instrumentales procedentes de series de lluvia en Murcia, y datos de volumen diario almacenado en los embalses de Valdeinfierno y Puentes, han permitido completar una serie mensual de lluvia en la cuenca de estudio. Estas series se han aplicado en el

modelo hidrológico y sedimentario distribuido TETIS-SED, permitiendo reconstruir el comportamiento hidrológico y de producción de sedimento en la cuenca desde mitad del siglo XIX. Los resultados muestran una elevada actividad hidrológica y sedimentaria desde finales del siglo XIX hasta mediados del siglo XX, y que tiende a disminuir de forma significativa desde mediados del siglo XX en la producción de sedimentos y la escorrentía, coincidentes con un periodo de disminución en la precipitación.

La comparación entre el periodo reconstruido mediante valores de reanálisis respecto al reconstruido con las series determinadas con datos locales, indica una divergencia de resultados importante (Jacob et al., 2007). La falta de correlación entre las dos metodologías, se debe probablemente al efecto que ejercen sobre la precipitación las condiciones orográficas locales, limitando su distribución espacial. Estas restricciones no son consideradas por los Modelos de Circulación General, lo que conlleva diferencias en los resultados de cada método (Goodess y Jones, 2002; Herrera et al., 2010). La falta de correlación entre las series de dependencia climática y las series locales compromete la fiabilidad de la modelización climática considerando estimaciones en base a circulación global (Gomez-Navarro et al., 2011).

Las proyecciones obtenidas para los modelos hidrológicos en la cuenca de Valdeinfierno se han elaborado considerando que las variaciones climáticas a lo largo del siglo XXI, se asemejaran a las condiciones actuales durante el periodo de referencia (1960-1990). Los métodos de downscaling estadístico sobre los que se aplican las anomalías consideradas en los distintos GCMs (IPCC, 2007b) constituyen una aproximación conservadora frente a los cambios observados como consecuencia de la variabilidad del clima en el pasado, tanto a escala histórica (1863-1971) como geológica (últimos 7000 años). En los resultados del periodo pre-instrumental-histórico se observa que la mayor densidad de eventos en la serie se concentra en la última parte del siglo XIX (1863-1900) y a mediados de siglo XX (-1945-1970). Esta mayor concentración en ambos periodos ha sido observada en otros estudios realizados en la cuenca (Benito et al., 2010; Machado et al., 2011) y concuerdan con periodos de elevada inestabilidad climática (e.g. Trouet et al., 2012). En dichos periodos se produce un aumento importante en la temperatura (IPCC, 2013), y en la frecuencia de precipitaciones extremas (Corella et al., 2014). Igualmente, la falta de correlación entre las series de reanálisis (reconstruidas en base a modelos climáticos para el siglo XIX y XX) y los registros locales en el periodo reconstruido (regionales, históricos y naturales) y la dificultad de los modelos de circulación atmosférica para simular los eventos extremos (probabilidad de excedencia menor del 1%), implican que los resultados de la proyección climática en la cuenca de Valdeinfierno son muy conservadores (respecto a la erosión), y deben ser considerados con reservas.

La gestión y usos de los suelos de la cuenca de Valdeinfierno, ha demostrado ser un elemento muy determinante en la hidrología de la cuenca, y especialmente en la erosión y el transporte de sedimentos. Respecto a la hidrología, se ha observado que una vegetación más madura (bosque/matorral) en las partes bajas de la cuenca, regula y ralentiza el volumen y el pico máximo de caudal, aunque no influyen de manera importante en la producción de sedimentos que se genera en las partes altas y las laderas. Respecto a la erosión, se ha determinado que esta

aumenta proporcionalmente a la pendiente e inversamente al grado de desarrollo de la vegetación.

El análisis de distintas configuraciones de usos en un mismo periodo de simulación, ha permitido definir la relación de la hidrología y el transporte de sedimentos independientemente. De este modo se ha determinado que mientras que la hidrología de la cuenca es dependiente de los porcentajes de usos del suelo, la producción de sedimento (erosión) es dependiente de la ubicación espacial de dichos usos. Este comportamiento diferencial implica que no se puede determinar ni gestionar el mejor escenario de usos del suelo únicamente a partir de la hidrología, ya que en cuencas como la de Valdeinfierno, el escenario óptimo para la mitigación de los eventos en base a las simulaciones hidrológicas puede ser distinto al escenario óptimo para la mitigación de los eventos en base a las simulaciones de transporte de sedimentos.

En todos los intervalos, se ha observado que tanto la hidrología como la producción de sedimento dependen de la distribución y la gestión de los usos del suelo, aunque afecta en mayor medida a este último. En este sentido, durante periodo de proyección (2010-2100) se puede afirmar que los usos del suelo constituyen la variable más determinante en la producción de sedimento. Esta afirmación implica que en el periodo reconstruido, la configuración utilizada constituye una aproximación conservadora, debido a que se ha considerado los ciclos y técnicas de cultivo modernas (en las que se tiene prácticas de conservación del suelo), y no las técnicas tradicionales utilizadas a principio de siglo XX.

La gran influencia de la gestión y los usos del suelo sobre la erosión permite su mitigación de forma mucho más inmediata que la problemática de la variación climática. Teniendo en cuenta que las políticas de gestión tienen que estar adaptadas al sostenimiento socio-económico y ambiental de las zonas rurales (European-Comision, 2012b, a), se puede afirmar que una configuración de usos del suelo que contemple un balance de aprovechamiento económico (agrícola) y de cubierta natural, manteniendo la producción de sedimento en valores razonables, constituye la solución más sostenible en un futuro próximo.

Los resultados de las distintas simulaciones conjuntamente con los registros instrumentales e históricos, y la comparación de los distintos escenarios de cambio climático, han llevado a definir el comportamiento de la cuenca de Valdeinfierno a lo largo de más de dos siglos a escala mensual y/o diaria, con buen grado de fiabilidad. Estos resultados conjuntamente con la determinación del papel y peso de los diferentes parámetros que intervienen en la erosión y producción de sedimento (principalmente gestión y uso del suelo), han permitido analizar el comportamiento general de la cuenca de estudio y la influencia de los forzamientos climáticos y de cambio ambiental sobre su hidrología y erosión. Se ha constatado el importante papel que suponen los eventos extremos, durante los cuales se genera la mayor parte de la producción de sedimento y los principales cambios geomorfológicos (incisión y acumulación de grandes espesores de sedimento). Dicha dependencia permite afirmar que los picos máximos de escorrentía son los que determinan la hidrología de la cuenca de Valdeinfierno. Igualmente, se

ha determinado que una parte mayoritaria del transporte de sedimentos se produce durante un número muy limitado de eventos extremos con gran capacidad erosiva y de transporte sedimentario.

La progresiva disminución de la escorrentía en la cuenca observada y simulada desde mediados del siglo XIX, conlleva una reducción importante de la erosión, que pasa de valores extremadamente elevados, por encima de 60 t/Ha en la década de 1870 (erosión acelerada), a valores por debajo de 5 t/Ha en las proyecciones del siglo XXI (erosión moderada según la clasificación de Romero-Díaz et al. 2011). La gran variabilidad entre los distintos periodos de observación, indica una alta susceptibilidad a las variaciones ambientales, y justifica las diferencias entre los valores de erosión determinadas en distintos estudios en la cuenca alta del río Guadalentín (e.g. 0.68 t/Ha en Baartman et al., 2012 ; frente a 125 t/Ha en (Lopez-Bermudez, 1990). Por el mismo motivo, el registro de una tasa media de erosión durante periodos cortos (pocos años o décadas) puede no ser representativo y conllevar errores importantes. Por tanto, se hace necesario simular el transporte de sedimentos considerando su distribución espacio-temporal a escala de evento y durante periodos de tiempo largos (>50 años).

Queda demostrado que las dinámica hidrológica y sobre todo de erosión en la cuenca de Valdeinfierno, son muy susceptibles a las variaciones climáticas y a los cambios en los usos del suelo. La información meteorológica disponible durante los siglos XIX y XX aplicada sobre la cuenca de estudio, indica que su comportamiento está fuertemente condicionado por la dinámica de circulación local, principalmente las precipitaciones extremas, aunque también responde a los grandes cambios a nivel regional. La distribución de los usos de los suelos supone una importantísima herramienta de control de la erosión, ya que resulta más fácil actuar a escala local con cambios sostenibles en el uso del suelo, que influir en la reducción de las emisiones que pueden afectar al calentamiento global.

A pesar de las dificultades que plantea la modelización hidro-sedimentaria en cuencas mediterráneas no aforadas, el modelo distribuido TETIS-SED ha demostrado ser una aproximación válida para el estudio del comportamiento hidrológico y de la estimación de la producción de sedimentos durante eventos hidrológicos extremos. Éste modelo ha permitido definir en detalle las tendencias pasadas, presentes y futuras de la zona de estudio, poniendo en relieve las limitaciones de la aplicación de los modelos de variabilidad climática global sobre cuencas torrenciales con un importante componente climático local. Por estos motivos, se considera que los resultados de esta tesis doctoral suponen un aporte muy importante a la comprensión en detalle de los procesos hidrológicos que se producen en las cuencas mediterráneas torrenciales, y aporta una nueva propuesta metodológica para el estudio hidro-sedimentario en este tipo de ambientes con escasa información instrumental.

7.3. líneas a desarrollar

Los múltiples campos y temáticas que se han tratado en el contenido de la presente tesis suscitan nuevas cuestiones e ideas que invitan a nuevas posibles vías de investigación que, por falta de tiempo, ha sido imposible de desarrollar en este trabajo, pero que se consideran líneas interesantes a desarrollar en el futuro.

Respecto al ambiente aluvial holoceno en la cuenca, los niveles reconocidos y estudiados a mayor detalle de la cuenca consisten en los niveles más recientes, principalmente de los últimos 3000 años B.P, aunque se han datado niveles y fases de agradación más antiguas. Una posible investigación futura debería analizar más puntos en los que la geomorfología indique la presencia de depósitos anteriores, para poder definir con mayor claridad los procesos acontecidos en la cuenca a lo largo de la primera parte del Holoceno y Pleistoceno.

Se ha puesto en relieve que la morfología de la cuenca alta del Guadalentín en distintos periodos de tiempo podría estar ligada a procesos tectónicos locales y regionales. Se ha descrito diversas evidencias de sismitas que han sido detectadas en distintos puntos de la cuenca y han sido datados en distintos intervalos temporales. La presencia de este tipo de estructuras en sedimentos fluviales (que debido a su formación están bien estructurados) debería ser investigada con mayor profundidad con el objetivo de poder definir períodos de retorno de los eventos sísmicos que tanta importancia cobran cuando se producen cerca de zonas pobladas, como el caso de Lorca en el sismo de Mayo de 2011.

Se ha determinado que el modelo TETIS-SED es una buena aproximación al comportamiento hidrológico y sedimentológico de la cuenca no aforada de Valdeinfierno. En el área Mediterránea existen un gran número de cuencas con características muy similares a esta cuenca, que si bien no son tan conocidas, presentan una muy alta torrencialidad en ambientes climáticos equivalentes. Estos dos factores indican la necesidad de adaptar el modelo a otras cuencas mediterráneas y así definir por un lado la aplicabilidad del modelo y por otro el ambiente hidro-sedimentario de otras cuencas.

Todas las simulaciones de proyección de la presente tesis se han elaborado según los escenarios de emisiones y los modelos de circulación global definidos en base al 4º informe del IPCC (2007). Puesto que recientemente ha sido publicado el 5º informe del IPCC (2014) con un nuevo conjunto de escenarios de emisión y modelos de circulación global, sería necesario reconfigurar las simulaciones de proyección para que se adapten a los nuevos escenarios.

En las reconstrucciones de la hidrología y el transporte de sedimentos en periodo histórico, se ha determinado que los modelos de reanálisis global no son capaces de simular los procesos de precipitación locales y regionales en la cuenca de estudio. Sería interesante determinar, siguiendo la misma metodología empleada, cual es la fiabilidad de los modelos reanálisis existentes de escala regional.

7.4. Principales aportaciones.

El estudio hidrológico y de aporte sedimentario a largo plazo en una cuenca Mediterránea no aforada ha requerido la puesta a punto de una metodología que permitan combinar registros pasados (geológicos y documentales), presentes (instrumentales y evidencias *Proxy*) y futuros (escenarios de clima y usos de suelo), que han requerido los siguientes trabajos específicos:

- Estudios geomorfológicos y estratigráficos que aportan información sobre la distribución espacio-temporal de los principales periodos de aportes sedimentarios, su contexto climático, historia ambiental y de ocupación humana.
- Implementación de un sistema de información geográfica con cartografías temáticas sobre las características geológicas, usos de suelo, vegetación, topografía, cuya principal aportación es la caracterización de las propiedades hidrológicas de los suelos en base a datos de campo y análisis de laboratorio.
- Adaptación de un modelo distribuido hidrológico y de producción de sedimento (TETIS-SED) a una cuenca no aforada.
- Calibración sedimentaria a distintas escalas temporales y espaciales, mediante el análisis estratigráfico y volumétrico de los sedimentos retenidos en diques forestales, apoyado con técnicas de topografía de alta resolución (RTK-GPS y Láser Escáner Terrestre).
- Reconstrucción de la climatología local a partir de modelos sinópticos de circulación climática global (*downscaling* estadístico).
- Adaptación de modelos de circulación general de la atmósfera (GCMs) de proyección climática a la modelización hidrológica y de producción de sedimento en una cuenca mediterránea, teniendo en cuenta tres escenarios socio-económicos (SRES: B1, A1B, y A2).
- Elaboración de mapas de uso del suelo en base a escenarios de cambio socio-económico (demografía, política agraria y medioambiental), y que han permitido valorar el papel del cambio climático y ambiental (usos del suelo) en la respuesta hidro-sedimentaria de la cuenca.
- Reconstrucción de la hidrología y la producción de sedimentos partiendo de la recopilación de datos documentales e históricos, registros hidro-climáticos regionales, y modelos climáticos de reanálisis.

7.5. Conclusiones generales.

De este estudio se concluye que la caracterización hidrológica y sedimentaria en cuencas mediterráneas necesita registros a largo plazo, que permitan determinar la respuesta compleja de

estos sistemas a la variabilidad climática y ambiental. La obtención de estos registros hidro-sedimentarios requieren de métodos y técnicas inter-disciplinares, particularmente en cuencas no aforadas o con escasos registros instrumentales. Asimismo, de lo expuesto en los diferentes capítulos de esta tesis se extraen las siguientes conclusiones específicas:

- Los registros Holocenos de la cuenca de estudio, han permitido determinar que desde al menos los últimos 3000 años existe un comportamiento hidrológico y sedimentario similar al actual. Dichos registros muestran una elevada frecuencia de los eventos extremos agrupados en periodos temporales de pocas décadas, que incrementan considerable la erosión y el aporte sedimentario a los fondos de valle. La datación de las secuencias aluviales indican que los pulsos sedimentarios está asociados con momentos de cambio climático regional (momentos fríos y/o de transición climática), que pueden ser magnificados por la ocupación humana del territorio.
- El modelo hidrológico distribuido TETIS-SED ha demostrado ser una herramienta adecuada y estable para la caracterización del comportamiento torrencial de la cuenca de Valdeinfierno, siendo capaz de simular, reconstruir y proyectar dicho comportamiento en función de distintos intervalos de tiempo y datos de entrada. No obstante se ha determinado que dicho modelo supone una aproximación conservadora en términos de la magnitud de los eventos hidrológicos y la erosión producida en la cuenca.
- La determinación de la acumulación en los diques de retención en la cuenca de estudio mediante técnicas topográficas de alta resolución (TLS y RTK-GPS) ha permitido la calibración del modelo TETIS-SED, pudiendo ser validado con las batimetrías realizadas en el embalse de Valdeinfierno, que cierra la cuenca de estudio, sin que se presenten errores significativos derivados del cambio de escala.
- El modelo hidrológico TETIS-SED se ha mostrado robusto para simular el comportamiento hidrológico y sedimentológico de la cuenca a partir de proyecciones de los cambios futuros basados en diferentes escenarios climáticos y de cambio ambiental. Los resultados de dichas proyecciones demuestran que se producen cambios en la frecuencia (reducción) y magnitud (aumento) de los eventos extraordinarios, condicionando su aporte hídrico y sus efectos en la erosión a lo largo del siglo XXI.
- Las proyecciones obtenidas para los modelos hidrológicos en la cuenca de Valdeinfierno se han elaborado considerando que las variaciones climáticas a lo largo del siglo XXI, mostrando valores de aportes hidrológicos y sedimentarios para el horizonte 2099 similares a las condiciones del periodo instrumental. Esta consideración supone una aproximación conservadora frente a los cambios y tasas de aporte sedimentario reconstruidos durante el pasado como consecuencia de la variabilidad del clima en el pasado, tanto a escala histórica (s.XIX - XX) como geológica (Holoceno).
- Los registros histórico-documentales y pre-instrumentales locales y regionales aplicados al modelo hidrológico y sedimentario distribuido TETIS-SED, han permitido reconstruir la elevada actividad hidrológica y sedimentaria en la cuenca, desde finales del siglo XIX

hasta mediados del siglo XX y su progresiva disminución hasta la actividad registrada en periodo instrumental.

- Las aproximaciones en periodo pre-instrumental-histórico determinan que la mayor densidad de eventos en la serie se concentra en la última parte del siglo XIX (1863-1900) y a mediados de siglo XX (~1945-1970). Esta mayor concentración de avenidas extremas se corresponde con periodos de elevada inestabilidad climática en los que se produce un aumento importante en la temperatura (y en la frecuencia de lluvias intensas).
- La falta de correlación entre las series de reanálisis (reconstruidas en base a modelos climáticos para el siglo XIX y XX) y los registros locales en el periodo reconstruido (regionales, históricos y naturales) y la dificultad de los modelos de circulación atmosférica para simular los eventos extremos (probabilidad de excedencia menor del 1%), implican que los resultados de la proyección climática en la cuenca de Valdeinfierno son muy conservadores (respecto a la erosión/producción de sedimento), y deben ser considerados con reservas.
- La gestión y usos de los suelos de la cuenca de Valdeinfierno ha demostrado ser un elemento muy determinante en la hidrología de la cuenca, y especialmente en la erosión y el transporte de sedimentos. Se ha determinado que la respuesta hidrológica de la cuenca es dependiente de los porcentajes de usos del suelo, mientras que la producción de sedimento es dependiente de la ubicación espacial de dichos usos y al grado de desarrollo de la vegetación. Este comportamiento diferencial implica que la gestión ambiental y la selección del mejor escenario de uso del suelo en la cuenca debe de considerar tanto la hidrología como la producción de sedimento, ya que ambas pueden responder de forma no lineal.
- Se ha constatado que los usos del suelo constituyen la variable más determinante en la producción de sedimento. Esta afirmación implica que los resultados obtenidos en el periodo reconstruido constituyen una aproximación conservadora, debido a que se han considerado los ciclos y técnicas de cultivo modernas (en las que se tiene prácticas de conservación del suelo), y no las técnicas tradicionales utilizadas a principio de siglo XX.
- La elevada influencia de la gestión ambiental y los usos del suelo sobre la erosión permite actuar de forma más inmediata que sobre la mitigación del cambio climático, principalmente basada en la reducción de emisiones. Se puede afirmar que una configuración de usos del suelo que contemple un balance de aprovechamiento económico (agrícola) y de cubierta natural, manteniendo la producción de sedimento en valores tolerables, constituye la solución más óptima y sostenible en un futuro próximo.
- Se ha constatado que los eventos extremos, determinan la hidrología de la cuenca de Valdeinfierno. Igualmente, se ha determinado que una parte mayoritaria del transporte de sedimentos se produce durante un número muy limitado de eventos extremos con gran capacidad erosiva y de transporte sedimentario. Este comportamiento de la cuenca implica que el registro de una tasa media de erosión durante periodos cortos (pocos años

o décadas) puede no ser representativa y conllevar errores importantes, haciéndose necesario simular el transporte de sedimentos considerando una distribución espacio-temporal a escala de evento y durante periodos de tiempo largos (>50 años).

7.6. Conclusions

- The Holocene alluvial records on the study watershed, showed that its hydrological behavior has been similar for the last 3000 years. These records show a high frequency of extreme events in the period, which significantly increase erosion and sediment supply to the valley bottoms in times of regional climate change (cold times and / or climatic transition), which may be magnified by human occupation of the territory.
- The use of high resolution techniques (TLS and RTK-GPS) to determine the sediment volume accumulated upstream of check-dams has allowed the calibration of TETIS-SED model, which it has been validated, comparing the model output with a set of bathymetries at Valdeinfierno reservoir, which closes the study basin, without presenting significant errors from the change of scale.
- The distributed hydrological model TETIS-SED had allowed the reconstruction of the hydrological and sedimentological behavior of the basin, and also permitted the projection this behavior in the future based on different climate and environmental change. scenarios. The results of these projections show changes in frequency (decrease) and magnitude (increase) of the extraordinary events, conditioning the runoff and erosion of those processes along the XXI century.
- The local and regional historical and pre-instrumental records applied to the hydro-sedimentological model TETIS-SED, have allowed the reconstruction of the high hydro-sedimentary activity in the basin since the late nineteenth century until the mid-twentieth century and its gradual decrease to the activity recorded during instrumental.
- The obtained projections for the hydrological models in Valdeinfierno basin has been elaborated considering that the XXI century climate variations keep resemblance with the instrumental period conditions. This consideration represents a conservative approach to changes observed as a result of climate variability in the past, at historical (XIX & XX centuries) and geological (Holocene) scales.
- The approaches in historical pre-instrumental period determine the higher density of events focuses on the late nineteenth century (1863-1900) and mid-twentieth century (~ 1945-1970). This higher concentrations correspond to high climatic instability periods in which presents a significant increase in temperature and frequency of extreme precipitation events.
- The lack of correlation between reanalysis series (reconstructed based on climate for the nineteenth and twentieth century models)the local records in the reconstructed period

(regional, historical and natural) and the difficulty of atmospheric circulation models to simulate extreme events (probability of exceedance less than 1%), imply that the results of climate projection in Valdeinfierno basin are very conservative (regarding erosion), and should be considered with caution.

- Management and land uses in Valdeinfierno basin has proved to be a decisive factor in the basin hydrology and especially in erosion and sediment production. It has been determined that the hydrology of the basin is dependent on the percentage of land use while sediment yield is dependent on the spatial location of such uses and the degree of development of vegetation. This differential behavior means that the best land use management scenario cannot be assessed considering only the watershed hydrology, as it may differ from the optimal setting for the mitigation of erosion and sediment production.
- It has been concluded that land use is the most crucial variable in sediment production. This statement implies that the results obtained in the reconstructed period represent a conservative approach, because it has been considered modern farming techniques (with soil conservation techniques), and not the traditional techniques used on the early twentieth century.
- The high influence of land use and management on erosion, allows a much more immediate mitigation of its effects than the mitigation of climate change effects , since it is easier to act at local scale with sustainable changes in land use, than to influence the reduction of emissions that can affect global warming.. The optimal and more sustainable configuration of land uses in the near future, should include a balance of economic exploitation (agriculture) and natural cover, keeping sediment production in fair values.
- It has been found that extreme events, determine the hydrology of the Valdeinfierno basin. Also, it has been determined that a majority of sediment transport occurs over a very limited number of extreme events with great erosive and sediment production capacity. This behavior of the basin implies that the registration of an average erosion rate for short periods (a few years or decades) may not be representative of the watershed behavior and can lead to substantial errors. For this reason it is necessary to simulate sediment transport considering a event-scale distribution for long periods of time (> 50 years).
- The distributed hydrological model TETIS-SED has proved to be an adequate and stable tool for the characterization of Valdeinfierno torrential behavior, being able to reconstruct / project that behavior on different time scales with diverse input data. However it has been determined that this model provides a conservative approximation to the magnitude of hydrological events and to the watershed erosion.

Synthesis

Thesis title: Hydrology and sediment production at decadal and century scale of a Mediterranean watershed in response to climate variability and environmental changes.

Introduction:

The response of hydrological extremes to climate change has been one of central topics of the IPCC publications (from 1988). However, only in the last report (IPCC, 2014) the impact of global change on sediment production has been considered. The main uncertainties that arise therein are: (1) the lack of long time series of runoff and sediment records, and (2) the difficulty in disassociation between climate signal (rainfall pattern), the signal generated by land use and vegetation changes, affecting basin runoff.

This dissertation presents a new methodological approach based on (1) acquisition of long-term hydro-sedimentary records of geological evidences (geomorphological and sedimentary), documentary data (descriptions of extreme floods) and instrumental records (rain), and (2) analysis of the hydro-sedimentary response to climatic variations and changes in land use using a distributed hydrological model (TETIS-SED).

Summary:

The study site is part of the Upper River Guadalentín. It is a Mediterranean ungauged basin with a strong torrential behavior. It is located in southwestern Iberian Peninsula, between the provinces of Murcia and Almería. Its extension is a little above 400 km², and it has a total drop of approximately 1300 m, limited in its lowest point by Valdeinfierno Dam. The study basin is characterized by short hydrological-sedimentary records, which along with its torrential behavior can be considered representative of a large number of Mediterranean and high mountain basins. The basin response has been analyzed considering different time and record scale resolution: (a) geological scale from the early Holocene to present considering a centennial resolution (Chapter 3); (b) historical scale considering an annual-decadal resolution (Chapter 6); (c) instrumental scale considering a daily resolution (Chapter 4); and (d) future projections based on climate change and land management scenarios considering monthly-annual resolution (Chapter 5). This long-term approach, considering different resolutions in the analysis, improves our understanding of the hydrological and sedimentological dynamics along the basin history, and the trends and limitations of future projections including uncertainties associated with climate and global change models. The good correspondence between the

distributed model and the basin behavior implies that the methodology used in this thesis can be confidently applied to other basins with similar characteristics.

Multidisciplinary approach is necessary in studies of the hydro-sedimentary behavior of the basin at different time scales. Its biases and characteristics depend on the type of information used. For that reason, the methodology used throughout this thesis has been adapted in each interval to the extension of the period (from several millennia to a few decades) and the information and data available for each of those periods (geological, documentary and instrumental).

Production of sediment at millennial scale (Holocene) has been determined by applying retrodictive methods to infer hydro-sedimentary behavior of the basin from sedimentary and geomorphological evidences in response to climate variability and human influence. In historical and instrumental scale, the study of sediment production rates have been gathered by the application of the inductive method, considering field observations and measurements to develop an hydrodynamic model that can be generalized to other Mediterranean rivers. Observations, together with documentary and instrumental data have been used as a source for the implementation of the distributed hydro-sedimentary model TETIS-SED. This model has allowed the resemblance and reconstruction of the hydrological extremes occurred on the basin, and therefore to quantify the major factors involved in its sediment production. Regarding future projections, the hydro-sedimentary behavior of the basin has been projected based on different global change scenarios. These scenarios have been divided into climate evolution scenarios and settings (configurations) of land use management. Climate projection scenarios has been acquired from the IPCC (2007b) models scaled using statistical downscaling based on local meteorological series. Nevertheless, the future land uses configurations were estimated considering demographic and socio-economic plausible situations, based on given current conditions and the political, demographic and economic trends. The multiple combinations of climate scenarios and land use configurations have been implemented in the TETIS-SED model which has simulated a range of possible future trends in hydrology, erosion and sediment production in the watershed.

The results of the different simulations of basin Valdeinfierno using TETIS-SED model have shown that this tool is a suitable approach to the characterization of the basin, showing good accuracy, slightly conservative since it tends to underestimate the results of events extreme hydrological and erosion. Improving the simulation results obtained at different spatial scales (basin and sub-basin), have been possible due to calibration and validation TETIS-SED model using sediment produced indirect evidence for events individual runoff accumulated in forest dams (check-dams) and sediment retention in the Valdeinfierno reservoir.

The correspondence of the hydrological model results with observational data indicates the reliability of the model. For that reason it is possible to apply the climate changes provided by the 4th IPCC report (AR4) to the model. These variations affect recurrence (decrease) and magnitude (increase) of the extraordinary events in the watershed, conditioning their water

intake and its erosion effects during the XXI century. However, the application of the available information regarding hydrology during the nineteenth and twentieth centuries, compared with global models of climate reanalysis circulation, has revealed that the study area is strongly influenced by local atmospheric circulation conditions, but also responds to global climate changes. This strong dependence on local climate conditions, combined with the low frequency of extreme precipitation during the reference period used to calculate the meteorological conditions during the climate projection period (1961-1990), implies that the calculated results of climate projection should be considered with caution. That limitation does not affect the relationship between the scenarios of climate projection and the land uses configurations (only their absolute values). Therefore, the different projections suppose a useful tool in scenario selection oriented to minimize erosion processes in the studied watershed.

Different data (sedimentary, documentary and instrumental) in conjunction with the hydrologic and sediment transport model allows the characterization of Valdeinfierno as a hydrological extremes highly dependent watershed. During those extremes the highest erosion and sediment transport rates occur determined by the magnitude of the extreme phenomenon. Holocene alluvial records indicate that a similar behavior has been occurring in the basin for the last 3000 years. These records show that the alluvial aggradation is concentrated in certain time intervals lasting several decades, and those intervals are climatically coincident with cold periods and/or periods of climatic transition, which may be magnified by human occupation influence.

Management and land uses in Valdeinfierno basin has proved to be a decisive factor in the hydrological behavior of the basin, especially regarding erosion and sediment transport. It has been observed that while the hydrology of the basin is dependent on the percentage of each land use occupation, sediment transport and erosion are more dependent on the spatial distribution of land use, mainly referred to the local slope. The differences between hydrology and erosion behavior imply that the optimal soil use scenario for soil conservation, may differ from the optimal soil use scenario oriented to minimize the generated water volume during floods. The different land use configurations have shown that, in general, greater portions of land with dense natural vegetation, leads to greater soil conservation and a reduction of flood magnitude. However, an overabundance of natural vegetation restricts the human activities in the watershed. Therefore, it is concluded that the optimal land use configuration (more sustainable) should combine an advanced state of evolution of natural ecosystems on the slopes, along with farming techniques aimed at soil conservation in the more leveled areas, such as green fallow or multi-crop fields. From a practical point of view, it has been noted that the land use management is a major tool on global change mitigation in short and medium term, presenting faster and more efficient influence of soil uses implementation in erosion, than the effects of actions orientated to mitigate greenhouse gases emission effects on climate.

Conclusions:

The Holocene alluvial records on the study watershed, showed that its hydrological behavior has been similar for the last 3000 years. These records show a high frequency of extreme events in the period, which significantly increase erosion and sediment supply to the valley bottoms in times of regional climate change (cold times and / or climatic transition), which may be magnified by human occupation of the territory.

The use of high resolution techniques (TLS and RTK-GPS) to determine the sediment volume accumulated upstream of check-dams has allowed the calibration of TETIS-SED model, which it has been validated, comparing the model output with a set of bathymetries at Valdeinfierno reservoir, which closes the study basin, without presenting significant errors from the change of scale.

The distributed hydrological model TETIS-SED had allowed the reconstruction of the hydrological and sedimentological behavior of the basin, and also permitted the projection this behavior in the future based on different climate and environmental change. scenarios. The results of these projections show changes in frequency (decrease) and magnitude (increase) of the extraordinary events, conditioning the runoff and erosion of those processes along the XXI century.

The local and regional historical and pre-instrumental records applied to the hidro-sedimentológico model TETIS-SED, have allowed the reconstruction of the high hydro-sedimentary activity in the basin since the late nineteenth century until the mid-twentieth century and its gradual decrease to the activity recorded during instrumental.

The obtained projections for the hydrological models in Valdeinfierno basin has been elaborated considering that the XXI century climate variations keep resemblance with the instrumental period conditions. This consideration represents a conservative approach to changes observed as a result of climate variability in the past, at historical (XIX & XX centuries) and geological (Holocene) scales.

The approaches in historical pre-instrumental period determine the higher density of events focuses on the late nineteenth century (1863-1900) and mid-twentieth century (~ 1945-1970). This higher concentrations correspond to high climatic instability periods in which presents a significant increase in temperature and frequency of extreme precipitation events.

The lack of correlation between reanalysis series (reconstructed based on climate for the nineteenth and twentieth century models) the local records in the reconstructed period (regional, historical and natural) and the difficulty of atmospheric circulation models to simulate extreme events (probability of exceedance less than 1%), imply that the results of climate projection in Valdeinfierno basin are very conservative (regarding erosion), and should be considered with caution.

Management and land uses in Valdeinfierno basin has proved to be a decisive factor in the basin hydrology and especially in erosion and sediment production. It has been determined that the hydrology of the basin is dependent on the percentage of land use while sediment yield is dependent

on the spatial location of such uses and the degree of development of vegetation. This differential behavior means that the best land use management scenario cannot be assessed considering only the watershed hydrology, as it may differ from the optimal setting for the mitigation of erosion and sediment production.

It has been concluded that land use is the most crucial variable in sediment production. This statement implies that the results obtained in the reconstructed period represent a conservative approach, because it has been considered modern farming techniques (with soil conservation techniques), and not the traditional techniques used on the early twentieth century.

The high influence of land use and management on erosion, allows a much more immediate mitigation of its effects than the mitigation of climate change effects, since it is easier to act at local scale with sustainable changes in land use, than to influence the reduction of emissions that can affect global warming. The optimal and more sustainable configuration of land uses in the near future, should include a balance of economic exploitation (agriculture) and natural cover, keeping sediment production in fair values.

It has been found that extreme events, determine the hydrology of the Valdeinfierno basin. Also, it has been determined that a majority of sediment transport occurs over a very limited number of extreme events with great erosive and sediment production capacity. This behavior of the basin implies that the registration of an average erosion rate for short periods (a few years or decades) may not be representative of the watershed behavior and can lead to substantial errors. For this reason it is necessary to simulate sediment transport considering a event-scale distribution for long periods of time (> 50 years).

The distributed hydrological model TETIS-SED has proved to be an adequate and stable tool for the characterization of Valdeinfierno torrential behavior, being able to reconstruct / project that behavior on different time scales with diverse input data. However it has been determined that this model provides a conservative approximation to the magnitude of hydrological events and to the watershed erosion.

Bibliografía

- Abrahart, R. J., Kirkby, M. J., McMahon, M. L., Bathurst, J. C., Ewen, J., Kilsby, C. G., White, S. M., Diamond, S., Woodward, I., Hawkes, J. C., Shao, J., y Thornes, J. B., 1996, Medrush - spatial and temporal river-basin modelling at scales commensurate with global environmental change, *in* Kovar, K., y Nachtnebel, H. P., eds., Application of geographic information systems in hydrology and water resources management: Wallingford, Int Assoc Hydrological Sciences, p. 47-54.
- Acero, F. J., Gallego, M. C., y Garcia, J. A., 2012, Multi-day rainfall trends over the iberian peninsula: Theoretical and Applied Climatology, v. 108, no. 3-4, p. 411-423.
- Agencia-de-Medio-Ambiente, 1994, Plan de ordenación de recursos naturales, plan rector de uso y gestión, parque natural de sierra maria - los vélez, *in* Consejería de medio ambiente, J. d. a., ed.: Sevilla, Agencia de medio ambiente, p. 99 pp.
- , 2005, Plan de ordenación de recursos naturales, plan rector de uso y gestión, parque natural de sierra maria - los vélez, *in* Consejería de medio ambiente, J. d. a., ed.: Sevilla, Agencia de medio ambiente, p. 204 pp.
- Aguirre Segura, A., Alcocer Martínez, F., Castro Nogueira, H., Cueto Romero, M., Domené Fernández, J., Guirado Romero, J., Guirado Romero, N., Mendoza Castellón, R., y Soler Márquez, M., 1997, Análisis y problemática de gestión de los recursos naturales (florísticos y faunísticos) en el parque natural sierra maria-los vélez (almería), Instituto de Estudios Almerienses.
- Alatorre, L. C., Begueria, S., y Garcia-Ruiz, J. M., 2010, Regional scale modeling of hillslope sediment delivery: A case study in the barasona reservoir watershed (spain) using watem/sedem: Journal of Hydrology, v. 391, no. 1-2, p. 111-125.
- Albaladejo, J., Martinez-Mena, M., Roldan, A., y Castillo, V., 1998, Soil degradation and desertification induced by vegetation removal in a semiarid environment: Soil Use and Management, v. 14, no. 1, p. 1-5.
- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Tank, A., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Kumar, K. R., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D. B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., Taylor, M., New, M., Zhai, P., Rusticucci, M., y Vazquez-Aguirre, J. L., 2006, Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation: Journal of Geophysical Research-Atmospheres, v. 111, no. D5.
- Almarza Mata, C. L. D. J. A. F. H. C., 1996, Homogeneidad y variabilidad de los registros históricos de precipitación de España, Madrid, Dirección General del Instituto Nacional de Meteorología.
- Almorox, J., de Antonio, R., Saa, A., Cruz Díaz, M., y Gascú, J. M., 1994, Métodos de estimación de la erosión hídrica, Madrid, Agrícola española, 152 p.:
- Allen, R. G., Pereira, L., Raes, D., y Smith, M., 1998, Crop evapotranspiration : Guidelines for computing crop water requirements, rome, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Fao. Irrigation and drainage paper, 300 p.:
- Andreo Navarro, B., 1990, Consideraciones sobre la geología de las sierras de maría y del mahimón.: Revista Velezana, v. 9, p. 62-72.
- Anonimous, 1891a, Montes de vélez-blanco, vélez-rubio y maría: Montes, v. XV, no. 344, p. 211-213.
- , 1891b, Repoblaciones en la cuenca del segura: Montes, v. XV, no. 350,351,352, p. 329-334, 349-353 & 385-389.
- Aparicio, A., Albaladejo, R. G., Olalla-Tárraga, M. Á., Carrillo, L. F., y Rodríguez, M. Á., 2008, Dispersal potentials determine responses of woody plant species richness to environmental factors in fragmented mediterranean landscapes: Forest Ecology and Management, v. 255, no. 7, p. 2894-2906.
- Araque Jiménez, E., 2009, Refundición de dominios y repoblación forestal en la porción andaluza de la cuenca del río guadalentín: Investigaciones geograficas, v. 48, p. 29.
- Armas, C., Del Barrio, G. y Puigdefabregas, J., Checkdam condition as an indicator of catchment features associated with storm flood generation in southern Spain, *in* Proceedings Proceeding of the First European Conference on Erosion Control., Sitges, Spain, 1996.
- , Control de la variación espacial de la morfometría de las cuencas en el estado de los diques de cabecera del río guadalentín (almería, murcia). *in* Proceedings Investigaciones recientes de la Geomorfología

- española. Aportaciones a la V Reunión Nacional de Geomorfología., Granada, Spain, 1998, Sociedad Española de Geomorfología p. 153-160.
- Arnold, J. G., y Allen, P. M., 1999, Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records: *Journal of the American Water Resources Association*, v. 35, no. 2, p. 411-424.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Mutiah, R. S., y Williams, J. R., 1998, Large area hydrologic modeling and assessment part i: Model development: *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, v. 34, no. 1, p. 73-89.
- Avedaño, C., Sanz Montero, M.E., Cobo, R., Gomez, J.L., Sediment yield at spanish reservoirs and its relationship with the drainage basin area., *in* *Proceedings 19th Symposium of Large Dams*, Florence, 1997, Volume 54, ICOLD (International Comittee on Large Dams), p. 863-887.
- Baartman, J. E. M., Jetten, V. G., Ritsema, C. J., y de Vente, J., 2012, Exploring effects of rainfall intensity and duration on soil erosion at the catchment scale using openlisem: Prado catchment, se spain: *Hydrological Processes*, v. 26, no. 7, p. 1034-1049.
- Baartman, J. E. M., Temme, A. J. A. M., Veldkamp, T., Jetten, V. G., y Schoorl, J. M., 2013, Exploring the role of rainfall variability and extreme events in long-term landscape development: *Catena*, v. 109, no. 0, p. 25-38.
- Baartman, J. E. M., Veldkamp, A., Schoorl, J. M., Wallinga, J., y Cammeraat, L. H., 2011, Unravelling late pleistocene and holocene landscape dynamics: The upper guadalentin basin, se spain: *Geomorphology*, v. 125, no. 1, p. 172-185.
- Baena Pérez, J., 1972, Mapa geológico de españa-931: Zarcilla de ramos: Instituto Geologico y Minero de España (IGME), scale 1:50000.
- Baena Perez, J., de Torres, T., Geel, T., y Roep, T. B., 1976, Mapa geológico de españa-952: Vélez blanco: Instituto Geologico y Minero de España (IGME), scale 1:50000.
- Baena Perez, J., Guzman del pino, J. L., y Jerez Mir, F., 1978, Mapa geológico de españa-951: Orce: Instituto Geologico y Minero de España (IGME), scale 1:50000.
- Baker, V. R., Kochel, R. C., Patton, P. C., y Pickup, G., 1983, Palaeohydrologic analysis of holocene flood slack-water sediments: Modern and ancient fluvial systems, v. 6, p. 229-239.
- Barbera, G., López Bermúdez, F., y Romero Díaz, A., 1997, Cambios de uso del suelo y desertificación en el mediterráneo: El caso del sureste ibérico, *in* García Ruiz, J. M., y López García, P., eds., *Acción humana y desertificación en ambientes mediterráneos*: Zaragoza, Spain, Instituto Pirenaico de Ecología. CSIC, p. 9-39.
- Barriendos, M., 1997, La reconstrucción paleoambiental a través de documentación histórica. Las cuencas de sobirans y vallalta (maresme, barcelona) en 10 siglos xvi-xix: *Revista de Geografía*, v. 30-31, p. 16.
- Barriendos, M., y Martín-Vide, J., 1998, Secular climatic oscillations as indicated by catastrophic floods in the spanish mediterranean coastal area (14th–19th centuries): *Climatic Change*, v. 38, no. 4, p. 473-491.
- Barriendos, M., y Rodrigo, F., 2006, Study of historical flood events on spanish rivers using documentary data: *Hydrological sciences journal*, v. 51, no. 5, p. 765-783.
- Barthès, B., y Roose, E., 2002, Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels: *CATENA*, v. 47, no. 2, p. 133-149.
- Beasley, D. B., Huggins, L. F., y Monke, E. J., 1980, Answers: A model for watershed planning, v. 23, no. 4.
- Beaulant, A. L., Joly, B., Nuissier, O., Somot, S., Ducrocq, V., Joly, A., Sevault, F., Deque, M., y Ricard, D., 2011, Statistico-dynamical downscaling for mediterranean heavy precipitation: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 137, no. 656, p. 736-748.
- Belmonte-Serrato, F., y Romero Díaz, A., 2006, Medida de la precipitación incorporada al suelo bajo distintas cubiertas vegetales en ambiente mediterráneo semiárido, tomando como indicador las variaciones de humedad: *Papeles de geografía*, v. 43, p. 5.
- Belmonte Serrato, F., Romero Díaz, A., López Bermúdez, F., y Hernández Laguna, E., 1999, Óptimo de cobertura vegetal en relación a las pérdidas de suelo por erosión hídrica y las pérdidas de lluvia por interceptación: *Papeles de geografía*, v. 30, p. 5-15.
- Bellian, J. A., Kerans, C., y Jennette, D. C., 2005, Digital outcrop models: Applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling: *Journal of Sedimentary Research*, v. 75, no. 2, p. 166-176.

- Benestad, R. E., Hanssen-Bauer, I., y Chen, D., 2008, Empirical-statistical downscaling, World Scientific Publishing Company Incorporated, 228 pp p.:
- Benito, G., Díez-Herrero, A., Rico, M., Sánchez-Moya, Y., Sopeña, A., y Thorndycraft, V. R., 2004a, Hidrología de paleoavenidas y seguridad de presas: Palaeoflood hydrology and dam safety.
- Benito, G., Lang, M., Barriendos, M., Llasat, M. C., Frances, F., Ouarda, T., Thorndycraft, V. R., Enzel, Y., Bardossy, A., Coeur, D., y Bobee, B., 2004b, Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation. Review of scientific methods: Natural Hazards, v. 31, no. 3, p. 623-643.
- Benito, G., Macklin, M. G., Zielhofer, C., Jones, A., y Machado, M. J., 2014, Holocene flooding and climate change in the mediterranean: CATENA, v. submitted.
- Benito, G., Rico, M., Sánchez-Moya, Y., Sopeña, A., Thorndycraft, V. R., y Barriendos, M., 2010, The impact of late holocene climatic variability and land use change on the flood hydrology of the guadalentín river, southeast spain: Global and Planetary Change, v. 70, no. 1-4, p. 53-63.
- Benito, G., Thorndycraft, V. R., Rico, M., Sánchez-Moya, Y., y Sopeña, A., 2008, Palaeoflood and floodplain records from spain: Evidence for long-term climate variability and environmental changes: Geomorphology, v. 101, no. 1-2, p. 68-77.
- Bernstein, L., Bosch, P., Canziani, O., Chen, Z., Christ, R., Davidson, O., Hare, W., Huq, S., Karoly, D., Kattsov, V., Kundzewicz, Z., Liu, J., Lohmann, U., Manning, M., Matsuno, T., Menne, B., Metz, B., Mirza, M., Nicholls, N., Nurse, L., Pachauri, R., Palutikof, J., Parry, M., Qin, D., Ravindranath, N., Reisinger, A., Ren, J., Riahi, K., Rosenzweig, C., Matilde, Rusticucci, Schneider, S., Sokona, Y., Solomon, S., Stott, P., Stouffer, R., Sugiyama, T., Swart, R., Tirpak, D., Vogel, C., y Yohe, G., 2007, Climate change 2007: Synthesis report: IPCC.
- Beven, K., 1993, Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modeling: Advances in Water Resources, v. 16, no. 1, p. 41-51.
- Beven, K., 1997, Topmodel: A critique: Hydrological Processes, v. 11, no. 9, p. 1069-1085.
- Beven, K., 2001, How far can we go in distributed hydrological modelling?: Hydrology and Earth System Sciences, v. 5, no. 1, p. 1-12.
- Beven, K., y Freer, J., 2001, A dynamic topmodel: Hydrological Processes, v. 15, no. 10, p. 1993-2011.
- Bloschl, G., y Sivapalan, M., 1995, Scale issues in hydrological modeling - a review: Hydrological Processes, v. 9, no. 3-4, p. 251-290.
- Boardman, J., y Favis-Mortlock, D., 1998a, Modelling soil erosion by water, *in* Boardman, J., y Favis-Mortlock, D., eds., Modelling soil erosion by water, Volume 55, p. 3-6.
- , 1998b, Modelling soil erosion by water: Some conclusions, *in* Boardman, J., y Favis-Mortlock, D., eds., Modelling soil erosion by water, Volume 55, p. 515-517.
- Boberg, F., Berg, P., Thejll, P., Gutowski, W., y Christensen, J., 2010, Improved confidence in climate change projections of precipitation further evaluated using daily statistics from ensembles models: Climate Dynamics, v. 35, no. 7-8, p. 1509-1520.
- Boellstorff, D., y Benito, G., 2005, Impacts of set-aside policy on the risk of soil erosion in central spain: Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 107, no. 2-3, p. 231-243.
- Boix-Fayos, C., de Vente, J., Martínez-Mena, M., Barbera, G. G., y Castillo, V., 2008, The impact of land use change and check-dams on catchment sediment yield: Hydrological Processes, v. 22, no. 25, p. 4922-4935.
- Bolstad, P., Jenks, A., Berkin, J., Horne, K., y Reading, W. H., 2005, A comparison of autonomous, waas, real-time, and post-processed global positioning systems (gps) accuracies in northern forests: Northern Journal of Applied Forestry, v. 22, no. 1, p. 5-11.
- Bousquet, J. C., 1979, Quaternary strike-slip faults in southern spain: Tectonophysics, v. 52, p. 277-286.
- Bracmort, K. S., Arabi, M., Frankenberger, J. R., Engel, B. A., y Arnold, J. G., 2006, Modeling long-term water quality impact of structural bmps: Transactions of the Asabe, v. 49, no. 2, p. 367-374.
- Brasington, J., Rumsby, B. T., y McVey, R. A., 2000, Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution gps-based survey: Earth Surface Processes and Landforms, v. 25, no. 9, p. 973-990.
- Brazdil, R., Kundzewicz, Z., Benito, G., y Brázdil, R., 2006, Historical hydrology for studying flood risk in europe: Hydrological sciences journal, v. 51, no. 5, p. 739-764.
- Breshears, D. D., 2006, The grassland-forest continuum: Trends in ecosystem properties for woody plant mosaics?: Frontiers in Ecology and the Environment, v. 4, no. 2, p. 96-104.

- Breuil, H., y Obermaier, H., 1914, Travaux en espagne: Region de vélez-blanco: L'Anthropologie, v. 25, p. 241-243.
- Brodie, I., y Rosewell, C., 2007, Theoretical relationships between rainfall intensity and kinetic energy variants associated with stormwater particle washoff: Journal of Hydrology, v. 340, no. 1-2, p. 40-47.
- Bronk Ramsey, C., 2009, Bayesian analysis of radiocarbon dates, 2009.
- Brown, C., Discussion of sedimentation in reservoir, *in* Proceedings of the American Society of Civil Engineers 1943, Volume 69, p. 1493-1500.
- Brune, G., 1953, Trap efficiency of reservoirs: Transactions, American Geophysical Union, v. 34, no. 3, p. 407-418.
- Brunet, M., Jones, P. D., Sigro, J., Saladie, O., Aguilar, E., Moberg, A., Della-Marta, P. M., Lister, D., Walther, A., y Lopez, D., 2007, Temporal and spatial temperature variability and change over Spain during 1850-2005: Journal of Geophysical Research-Atmospheres, v. 112, no. D12.
- Brunet, M., Saladie, O., Jones, P., Sigro, J., Aguilar, E., Moberg, A., Lister, D., Walther, A., Lopez, D., y Almarza, C., 2006, The development of a new dataset of Spanish daily adjusted temperature series (sdats) (1850-2003): International journal of climatology, v. 26, no. 13, p. 1777-1802.
- Buckley, S. J., Howell, J. A., Enge, H. D., y Kurz, T. H., 2008, Terrestrial laser scanning in geology: Data acquisition, processing and accuracy considerations: Journal of the Geological Society, v. 165, p. 625-638.
- Bussi, G., Francés, F., Montoya, J. J., y Julien, P. Y., 2014, Distributed sediment yield modelling: Importance of initial sediment conditions: Environmental Modelling & Software, v. 58, no. 0, p. 58-70.
- Bussi, G., Montoya, J. J., y Frances, F., 2009, Calibración de un modelo conceptual distribuido del ciclo de sedimentos. Aplicación a la cuenca experimental de Goodwin Creek (EEUU), *in* CEDEX, ed., I Jornadas sobre ingeniería del agua: Madrid, p. 11.
- Bussi, G., Rodríguez-Lloveras, X., Frances, F., Benito, G., Sánchez-Moya, Y., y Sopena, A., 2013, Sediment yield model implementation based on check dam infill stratigraphy in a semiarid Mediterranean catchment: Hydrology and Earth System Sciences, v. 17, no. 8, p. 3339-3354.
- Butzer, K. W., 1974, Accelerated soil erosion, *in* Manners, I., y Mikesell, M. W., eds., Perspectives on environment: Washington D.C., Association of American Geographers, p. 57-78.
- , 1975, Pleistocene littoral-sedimentary cycles of the Mediterranean basin: A Mallorquin view, *in* Butzer, K. W., y Isaac, G. L., eds., After the Australopithecines: The Hague, Mouton, p. 25-71.
- Cai, W., Collier, M. A., P.D., D., H.B., G., A.C., H., S.P., O. F., y P.H., W., 2003, The response of climate variability and mean state to climate change: Preliminary results from the CSIRO Mark 3 coupled model: CLIVAR Exchanges, v. 28, p. 8-11.
- Calatrava, J., Barbera, G. G., y Castillo, V. M., 2011, Farming practices and policy measures for agricultural soil conservation in semi-arid Mediterranean areas: The case of the Guadalentín basin in southeast Spain: Land Degradation & Development, v. 22, no. 1, p. 58-69.
- Calmel-Avila, M., 2000, Procesos hídricos holocenos en el bajo Guadalentín (Murcia, SE España): Cuaternario y Geomorfología v. 14, no. 3-4, p. 65-78.
- Calmel-Avila, M., 2002, The librilla "rambla", an example of morphogenetic crisis in the Holocene (Murcia, Spain): Quaternary International, v. 93-94, no. 0, p. 101-108.
- Calmel-Avila, M., Barroso, P. G. S., Bardaji, T., Goy, J. L. G., y Cardeña, C. Z., 1998, Drainage system inversion in the Guadalentín depression during the late Pleistocene - Holocene (Murcia, Spain) *in* Romero-Díaz, M. A., Belmonte-Serrato, F., Sarria, F. A., y López-Bermúdez, F., eds., Advances in studies on desertification: Contributions to the international conference on desertification in memory of professor John B. Thornes: Murcia, p. 461-464.
- Calvo García-Tornel, F., 1969, La huerta de Murcia y las avenidas del Guadalentín: Papeles del Departamento de Geografía, v. 1, p. 111-137.
- Cammeraat, E. L. H., 2004, Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain: Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 104, no. 2, p. 317-332.
- Cammeraat, L. H., 2002, A review of two strongly contrasting geomorphological systems within the context of scale: Earth Surface Processes and Landforms, v. 27, no. 11, p. 1201-1222.
- Canadian climate impacts scenarios, 2003, Canadian climate impacts and scenarios, frequently asked questions, *in* Studies, C. I. F. C., ed.: Victoria, University of Victoria.

- Capel Molina, J., 1974, Génesis de las inundaciones de octubre de 1973 en el sureste de la península ibérica: Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada, v. 4, p. 149-166.
- Carrión, J. S., 2002, Patterns and processes of late quaternary environmental change in a montane region of southwestern europe: Quaternary Science Reviews, v. 21, no. 18-19, p. 2047-2066.
- Carrión, J. S., Fernández, S., Jiménez-Moreno, G., Fauquette, S., Gil-Romera, G., González-Sampériz, P., y Finlayson, C., 2010, The historical origins of aridity and vegetation degradation in southeastern Spain: Journal of Arid Environments, v. 74, no. 7, p. 731-736.
- Carrión Vilches, M. A., Morell, M. G., Rincón, A. G., Herránz, P. L., García, L. M.-M., Moratón, E. M., y Fernández, D. S., 2005, El valle del guadaletín: Murcia en clave ambiental, v. 4.
- Carter, T. R., Alfsen, K., Barrow, E., Bass, B., Dai, X., Desanker, P., Gaffin, S. R., Giorgi, F., Hulme, M., Lal, M., Mata, L. J., Mearns, L. O., Mitchell, J. F. B., Morita, T., Moss, R., Murdiyarso, D., Pabon-Caicedo, J. D., Palutikof, J., Parry, M. L., Rosenzweig, C., Seguin, B., Scholes, R. J., y Whetton, P. H., 2007, General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment: IPCC.
- Castillo, V. M., Martínez-Mena, M., y Albaladejo, J., 1997, Runoff and soil loss response to vegetation removal in a semiarid environment: Soil Science Society of America Journal, v. 61, no. 4, p. 1116-1121.
- Casty, C., Wanner, H., Luterbacher, J., Esper, J., y Böhm, R., 2005, Temperature and precipitation variability in the European Alps since 1500: International journal of climatology, v. 25, no. 14, p. 1855-1880.
- CEDEX, 1976, Reconocimiento batimétrico del embalse de valdeinfierno, *in* hidráulicas, D. g. d. o., ed., Ministerio de obras públicas y urbanismo, p. 27.
- , 1984, Reconocimiento batimétrico del embalse de valdeinfierno, *in* hidráulicas, D. g. d. o., ed.: Madrid, Ministerio de obras públicas y urbanismo, p. 31.
- , 1995a, Reconocimiento batimétrico de embalses. Embalse de valdeinfierno, *in* hidráulicas, D. g. d. o., ed.: Madrid, Ministerio de obras públicas y urbanismo, p. 92.
- , 1995b, Reconocimientos sedimentológicos de embalses. Embalse de valdeinfierno, *in* hidráulicas, D. g. d. o., ed.: Madrid, Ministerio de medio ambiente, p. 146.
- , 1999, Máximas lluvias diarias en la España peninsular, *in* Transportes, S. d. E. d. I. y., y Carreteras, D. G. d., eds.: Madrid, Ministerio de Fomento, p. 55 pp.
- Cerdà, A., Giménez Morera, A., Burguet, M., Arcenegui, V., González Peñaloza, F. A., García-Orenes, F., y Pereira, P., 2012, The impact of the farming, abandonment and agricultural intensification on loss of water and soil. The example of the northern slopes of the Serra Grossa, eastern Spain: El impacto del cultivo, el abandono y la intensificación de la agricultura en la pérdida de agua y suelo. el ejemplo de la vertiente norte de la Serra Grossa en el este peninsular, v. 38, no. 1, p. 75-94.
- Clark, R. L., y Lee, R., 1998, Development of topographic maps for precision farming with kinematic GPS: Transactions of the ASAE, v. 41, no. 4, p. 909-916.
- Clarke, M. L., y Rendell, H. M., 2010, Climate-driven decrease in erosion in extant Mediterranean badlands: Earth Surface Processes and Landforms, v. 35, no. 11, p. 1281-1288.
- Coccia, G., y Todini, E., 2011, Recent developments in predictive uncertainty assessment based on the model conditional processor approach: Hydrology and Earth System Sciences, v. 15, no. 10, p. 3253-3274.
- Codorníu, R., 1906, Lluvias en septiembre de 1906 en la división hidrológico-forestal del Segura: Montes, v. XXX, no. N° 717, 718, p. 661-669, 693-701.
- Coe, R., y Stern, R. D., 1982, Fitting models to daily rainfall data: Journal of Applied Meteorology, v. 21, no. 7, p. 1024-1031.
- Cohn, T. A., y Stedinger, J. R., 1987, Use of historical information in a maximum-likelihood framework: Journal of Hydrology, v. 96, no. 1-4, p. 215-223.
- Collins, W. D., Bitz, C. M., Blackmon, M. L., Bonan, G. B., Bretherton, C. S., Carton, J. A., Chang, P., Doney, S. C., Hack, J. J., Henderson, T. B., Kiehl, J. T., Large, W. G., McKenna, D. S., Santer, B. D., y Smith, R. D., 2006, The community climate system model version 3 (CCSM3): Journal of Climate, v. 19, no. 11, p. 2122-2143.
- Compo, G. P., Whitaker, J. S., Sardeshmukh, P. D., Matsui, N., Allan, R. J., Yin, X., Gleason, B. E., Vose, R. S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., Brönnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R. I., Grant, A. N., Groisman, P. Y., Jones, P. D., Kruk, M. C., Kruger, A. C., Marshall, G. J., Maugeri, M., Mok, H. Y., Nordli, O., Ross, T. F., Trigo, R. M., Wang, X. L., Woodruff, S. D., y Worley, S. J., 2011, The

- twentieth century reanalysis project: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 137, no. 654, p. 1-28.
- Conesa García, C., 1985, Inundaciones en lorca (murcia): Riesgo y expectacion: papeles de geografía (física), v. 10, p. 33-47.
- Conesa García, C., y Álvarez Rogel, Y., 1996, El método de geometría de cauces aplicado a la estimación de caudales máximos de avenida en la vega alta del segura: Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe, v. 21, p. 469-481.
- Corella, J. P., Benito, G., Rodríguez-Lloveras, X., Brauer, A., y Valero-Garcés, B. L., 2014, Annually-resolved lake record of extreme hydro-meteorological events since ad 1347 in ne iberian peninsula: Quaternary Science Reviews, v. 93, no. 0, p. 77-90.
- CSMD, 2005, An introduction to the first-generation operational climate model at national climate center, advances in climate system modeling, in Division, C. S. M., ed., Volume 1: Beijing, National Climate Center, p. 14.
- Chandler, R. E., y Wheater, H. S., 2002, Analysis of rainfall variability using generalized linear models: A case study from the west of ireland: Water Resources Research, v. 38, no. 10, p. 1192.
- Chaparro, J., y Esteve, M., 1995, Evolución geomorfológica de laderas repobladas mediante aterrazamientos en ambientes semiáridos (murcia, se de españa): Cuaternario y Geomorfología, v. 9, no. 1-2, p. 39-49.
- Charlton, M. E., Large, A. R. G., y Fuller, I. C., 2003, Application of airborne lidar in river environments: The river coquet, northumberland, uk: Earth Surface Processes and Landforms, v. 28, no. 3, p. 299-306.
- Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R. K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Rueda, V. M., Mearns, L., Menéndez, C. G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A., y Whetton, P., 2007, Regional climate projections, in Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), ed., Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group i to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, p. pp. 847-940.
- Christensen, N. S., y Lettenmaier, D. P., 2007, A multimodel ensemble approach to assessment of climate change impacts on the hydrology and water resources of the colorado river basin: Hydrology and Earth System Sciences, v. 11, no. 4, p. 1417-1434.
- de Olazábal, L., 1898, Cuarenta años de propaganda forestal, R. Rojas.
- De Roo, A. P. J., Wesseling, C. G., y Ritsema, C. J., 1996, Lisem: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output: Hydrological Processes, v. 10, no. 8, p. 1107-1117.
- de Vente, J., Poesen, J., y Verstraeten, G., 2005, The application of semi-quantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of basin sediment yield in spain: Journal of Hydrology, v. 305, no. 1-4, p. 63-86.
- de Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Van Rompaey, A., y Govers, G., 2008, Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in spain: Global and Planetary Change, v. 60, no. 3-4, p. 393-415.
- de Vente, J., Verduyn, R., Verstraeten, G., Vanmaercke, M., y Poesen, J., 2011, Factors controlling sediment yield at the catchment scale in nw mediterranean geoecosystems: Journal of Soils and Sediments, v. 11, no. 4, p. 690-707.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J. J., Park, B. K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J. N., y Vitart, F., 2011, The era-interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 137, no. 656, p. 553-597.
- del Rio, S., Herrero, L., Fraile, R., y Penas, A., 2011, Spatial distribution of recent rainfall trends in spain (1961-2006): International journal of climatology, v. 31, no. 5, p. 656-667.

- Delrieu, G., Boudevillain, B., Nicol, J., Chapon, B., Kirstetter, P. E., Andrieu, H., y Faure, D., 2009, Bollene-2002 experiment: Radar quantitative precipitation estimation in the cevennes-vivarais region, france: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 48, no. 7, p. 1422-1447.
- Delworth, T. L., Broccoli, A. J., Rosati, A., Stouffer, R. J., Balaji, V., Beesley, J. A., Cooke, W. F., Dixon, K. W., Dunne, J., Dunne, K. A., Durachta, J. W., Findell, K. L., Ginoux, P., Gnanadesikan, A., Gordon, C. T., Griffies, S. M., Gudgel, R., Harrison, M. J., Held, I. M., Hemler, R. S., Horowitz, L. W., Klein, S. A., Knutson, T. R., Kushner, P. J., Langenhorst, A. R., Lee, H. C., Lin, S. J., Lu, J., Malyshev, S. L., Milly, P. C. D., Ramaswamy, V., Russell, J., Schwarzkopf, M. D., Shevliakova, E., Sirutis, J. J., Spelman, M. J., Stern, W. F., Winton, M., Wittenberg, A. T., Wyman, B., Zeng, F., y Zhang, R., 2006, Gfdl's cm2 global coupled climate models. Part i: Formulation and simulation characteristics: *Journal of Climate*, v. 19, no. 5, p. 643-674.
- Deque, M., Drevet, C., Braun, A., y Cariolle, D., 1994, The arpege/ifs atmosphere model - a contribution to the french community climate modeling: *Climate Dynamics*, v. 10, no. 4-5, p. 249-266.
- Descroix, L., y Gautier, E., 2002, Water erosion in the southern french alps: Climatic and human mechanisms: *Catena*, v. 50, no. 1, p. 53-85.
- DGIGC, 1948, Mapa topográfico nacional nº 952, vélez blanco, scale 1:50000.
- DGIGCE, 1931a, Mapa topográfico nacional nº 930, puebla de don fadrique, scale 1:50000.
- , 1931b, Mapa topográfico nacional nº 951, orce, scale 1:50000.
- , 1935, Mapa topográfico nacional nº 931, zarcilla de ramos, scale 1:50000.
- Diansky, N. A., Bagno, A. V., y Zalesny, V. B., 2002, Sigma model of global ocean circulation and its sensitivity to variations in wind stress: *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, v. 38, no. 4, p. 477-494.
- Diansky, N. A., y Volodin, E. M., 2002, Simulation of present-day climate with a coupled atmosphere-ocean general circulation model: *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, v. 38, no. 6, p. 732-747.
- Diodato, N., Ceccarelli, M., y Bellocchi, G., 2008, Decadal and century-long changes in the reconstruction of erosive rainfall anomalies in a mediterranean fluvial basin: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 33, no. 13, p. 2078-2093.
- Domingo, F., Sánchez, G., Moro, M. J., Brenner, A. J., y Puigdefábregas, J., 1998, Measurement and modelling of rainfall interception by three semi-arid canopies: *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 91, no. 3-4, p. 275-292.
- Donigan, A. S. J., Imhoff, J. C., y Bicknell, B. R., 1983, Predicting water quality resulting from agricultural nonpoint source pollution via simulation - hspf, *in* Schaller, F. W., y Baily, G. W., eds., *Agricultural management and water quality*: Ames, IA, Iowa State University Press, p. 209-249.
- Doswell, C. A., Brooks, H. E., y Maddox, R. A., 1996, Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology: *Weather and Forecasting*, v. 11, no. 4, p. 560-581.
- Duan, Q. Y., Sorooshian, S., y Gupta, V., 1992, Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models: *Water Resources Research*, v. 28, no. 4, p. 1015-1031.
- EEA, 1995, Corine land cover Commission of the European Communities
- , 2000, Corine land cover technical guide addendum 2000: Commission of the European Communities
- , 2006, Corine land cover: Commission of the European Communities
- , 2013, Towards a green economy in europe - eu environmental policy targets and objectives 2010-2050 European Environment Agency.
- Engelmann, C. J. K., Ward, A. D., Christy, A. D., y Bair, E. S., 2002, Application of the basins database and npsm model on a small ohio watershed1: *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, v. 38, no. 1, p. 289-300.
- Erskine, W. D., Mahmoudzadeh, A., y Myers, C., 2002, Land use effects on sediment yields and soil loss rates in small basins of triassic sandstone near sydney, nsw, australia: *Catena*, v. 49, no. 4, p. 271-287.
- Etoh, T., Murota, A., y Nakanishi, M., 1987, Sqrt-exponential type distribution of maximum, *in* Singh, V., ed., *Hydrologic frequency modeling*, Springer Netherlands, p. 253-264.
- European-Comision, 2012a, The common agricultural policy – a story to be continued, *in* Comision, E., ed.: Luxemburg, Publications Office of the European Union, p. 20 pp.
- , 2012b, The common agricultural policy, a partnership between europe and farmers, *in* Comision, E., ed.: Luxemburg, Publications Office of the European Union, p. 16 pp.

- , 2013a, The common agricultural policy (cap) and agriculture in europe – frequently asked questions: Brussels, European Comission, p. 13 pp.
- , 2013b, Political agreement on new direction for common agricultural policy: Brussels, European Comission, p. 3 pp.
- Faust, D., Zielhofer, C., Baena Escudero, R., y Diaz del Olmo, F., 2004, High-resolution fluvial record of late holocene geomorphic change in northern tunisia: Climatic or human impact?: Quaternary Science Reviews, v. 23, no. 16–17, p. 1757-1775.
- Feidas, H., Makrogiannis, T., y Bora-Senta, E., 2004, Trend analysis of air temperature time series in greece and their relationship with circulation using surface and satellite data: 1955-2001: Theoretical and Applied Climatology, v. 79, no. 3–4, p. 185-208.
- Fernandez, G. P., Chescheir, G. M., Skaggs, R. W., y Amatya, D. M., 2005, Development and testing of watershed-scale models for poorly drained soils: Transactions of the Asae, v. 48, no. 2, p. 639-652.
- Ferrer, F. J., 1996, El modelo de función de distribución sqtr-et max en el análisis regional de máximos hidrológicos: Aplicación a lluvias diarias [PhD Thesis: Universidad Politécnica de Madrid.
- Flanagan, D., Ascough, J., II, Nearing, M., y Laflen, J., 2001, The water erosion prediction project (wepp) model, *in* Harmon, R., y Doe, W., III, eds., Landscape erosion and evolution modeling, Springer US, p. 145-199.
- Flanagan, D., y Nearing, M., 1995, Usda water erosion prediction project: Hillslope profile and watershed model documentation, *in* USDA , A. R. S., ed., Volume Rep. 10: West Lafayette, Indiana, NSERL.
- Flato, G. M., y Boer, G. J., 2001, Warming asymmetry in climate change simulations: Geophysical research letters, v. 28, no. 1, p. 195-198.
- Fowler, H. J., Blenkinsop, S., y Tebaldi, C., 2007, Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling: International journal of climatology, v. 27, no. 12, p. 1547-1578.
- Frances, F., Velez, J. I., y Velez, J. J., 2007, Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models: Journal of Hydrology, v. 332, no. 1-2, p. 226-240.
- Francis, C., 1985, Hydrological investigations of soils in relation to gully head development in south east spain: Cuadernos de investigación geográfica, v. 10, p. 55-64.
- Frei, C., y Schär, C., 2001, Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the alpine region: Journal of Climate, v. 14, no. 7, p. 1568-1584.
- French, J. R., 2003, Airborne lidar in support of geomorphological and hydraulic modelling: Earth Surface Processes and Landforms, v. 28, no. 3, p. 321-335.
- Frias, M. D., Herrera, S., Cofino, A. S., y Gutierrez, J. M., 2010, Assessing the skill of precipitation and temperature seasonal forecasts in spain: Windows of opportunity related to enso events: Journal of Climate, v. 23, no. 2, p. 209-220.
- Fuller, I. C., Macklin, M. G., Passmore, D. G., Brewer, P. A., Lewin, J., y Wintle, A. G., 1996, Geochronologies and environmental records of quaternary fluvial sequences in the guadalupe basin, northeast spain, based on luminescence dating. , *in* Branson, J., Brown, A. G., y Gregory, K. J., eds., Global continental changes: The context of palaeohydrology, Volume Special Publication nº 115: London, Geological Society of London, p. 99-120.
- Furevik, T., Bentsen, M., Drange, H., Kindem, I. K. T., Kvamstø, N. G., y Sorteberg, A., 2003, Description and evaluation of the bergen climate model: Arpege coupled with micom: Climate Dynamics, v. 21, p. 27–51.
- Gan-Mor, S., Clark, R. L., y Upchurch, B. L., 2007, Implement lateral position accuracy under rtk-gps tractor guidance: Computers and Electronics in Agriculture, v. 59, no. 1-2, p. 31-38.
- Gao, X. J., y Giorgi, F., 2008, Increased aridity in the mediterranean region under greenhouse gas forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model: Global and Planetary Change, v. 62, no. 3-4, p. 195-209.
- Garcia-Ruiz, J. M., 2010, The effects of land uses on soil erosion in spain: A review: Catena, v. 81, no. 1, p. 1-11.
- Garcia-Ruiz, J. M., y Lana-Renault, N., 2011, Hydrological and erosive consequences of farmland abandonment in europe, with special reference to the mediterranean region - a review: Agriculture Ecosystems & Environment, v. 140, no. 3-4, p. 317-338.
- Garcia-Ruiz, J. M., y López Bermúdez, F., 2009, La erosión del suelo en españa, Zaragoza, Sociedad Española de Geomorfología, 441 p.:

- García, J. A., Gallego, M. C., Serrano, A., y Vaquero, J. M., 2007, Trends in block-seasonal extreme rainfall over the iberian peninsula in the second half of the twentieth century: *Journal of Climate*, v. 20, no. 1, p. 113-130.
- García Latorre, J., 1998, La agricultura almeriense antes y después de la expulsión de los moriscos. Una aproximación cuantitativa: *Chronica Nova*, v. 25, no. 17, p. 275-300.
- García Latorre, J., García-Latorre, J., y Sánchez-Picon, A., 2001, Dealing with aridity: Socio-economic structures and environmental changes in an arid mediterranean region: *Land Use Policy*, v. 18, no. 1, p. 53-64.
- Gasse, F., 2000, Hydrological changes in the african tropics since the last glacial maximum: *Quaternary Science Reviews*, v. 19, no. 1-5, p. 189-211.
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaskovicova, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., García, J., Irimescu, A., Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., Sempere-Torres, D., Stancalie, G., Szolgay, J., Tsanis, I., Velasco, D., y Viglione, A., 2009, A compilation of data on european flash floods: *Journal of Hydrology*, v. 367, no. 1-2, p. 70-78.
- Gea Pérez, D., 1986, Geología de la zona centro-oriental de las cordilleras béticas (comarca de los vélez, almería). Síntesis bibliográfica (parte i). *Revista Velezana*, v. 5, p. 89-122.
- , 1988, Itinerarios de interés en el parque natural de la sierra de maría. (parte i, rutas geológicas): *Revista Velezana*, v. 7, p. 80-84.
- Gibelin, A. L., y Deque, M., 2003, Anthropogenic climate change over the mediterranean region simulated by a global variable resolution model: *Climate Dynamics*, v. 20, no. 4, p. 327-339.
- Gil Olcina, A., 1968, El régimen del río guadalentín: *Cuadernos de geografía - Universidad de Valencia*, no. 5, p. 1.
- Gimeno, T. E., Pias, B., Martínez-Fernández, J., Quiroga, D. L., Escudero, A., y Valladares, F., 2012, The decreased competition in expanding versus mature juniper woodlands is counteracted by adverse climatic effects on growth: *European Journal of Forest Research*, v. 131, no. 4, p. 977-987.
- Gnanadesikan, A., Dixon, K. W., Griffies, S. M., Balaji, V., Barreiro, M., Beesley, J. A., Cooke, W. F., Delworth, T. L., Gerdes, R., Harrison, M. J., Held, I. M., Hurlin, W. J., Lee, H. C., Liang, Z., Nong, G., Pacanowski, R. C., Rosati, A., Russell, J., Samuels, B. L., Song, Q., Spelman, M. J., Stouffer, R. J., Sweeney, C. O., Vecchi, G., Winton, M., Wittenberg, A. T., Zeng, F., Zhang, R., y Dunne, J. P., 2006, Gfdl's cm2 global coupled climate models. Part ii: The baseline ocean simulation: *Journal of Climate*, v. 19, no. 5, p. 675-697.
- Gómez-Navarro, J. J., Montávez, J. P., Jerez, S., Jiménez-Guerrero, P., Lorente-Plazas, R., González-Rouco, J. F., y Zorita, E., 2011, A regional climate simulation over the iberian peninsula for the last millennium: *Climate of the Past*, v. 7, no. 2, p. 451-472.
- Gómez Cruz, M., 1991, Atlas histórico-forestal de andalucía, siglo xviii, Granada, Universidad de Granada, Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, Tierras del sur, 71 pp. p.:
- González-Hidalgo, J. C., López-Bustins, J. A., Stepanek, P., Martín-Vide, J., y de Luisa, M., 2009, Monthly precipitation trends on the mediterranean fringe of the iberian peninsula during the second-half of the twentieth century (1951-2000): *International journal of climatology*, v. 29, no. 10, p. 1415-1429.
- González Ramón, A., 1991, Hidrogeología de las sierras de la muela y el gigante.: *Revista Velezana*, v. 10, p. 53-62.
- Goodess, C. M., y Jones, P. D., 2002, Links between circulation and changes in the characteristics of iberian rainfall: *International journal of climatology*, v. 22, no. 13, p. 1593-1615.
- Goodess, C. M., y Palutikof, J. P., 1998, Development of daily rainfall scenarios for southeast spain using a circulation-type approach to downscaling: *International journal of climatology*, v. 18, no. 10, p. 1051-1083.
- Gordon, H. B., Rotstayn, L. D., McGregor, J. L., Dix, M. R., Kowalczyk, E. A., O'Farrell, S. P., Waterman, L. J., Hirst, A. C., Wilson, S. G., Collier, M. A., Watterson, I. G., y Elliott, T. I., 2002, The csiro mk3 climate system model: CSIRO atmospheric research technical paper.
- Guerrero-Arjona, M., 2007, El dominio del territorio: La repoblación cristiana del marquesado de los vélez tras la guerra de las alpujarras: *Revista Velezana*, v. 26, p. 37-48.
- Guo, S. L., y Cunnane, C., 1991, Evaluation of the usefulness of historical and palaeological floods in quantile estimation: *Journal of Hydrology*, v. 129, no. 1-4, p. 245-262.

- Gupta, H. V., Sorooshian, S., y Yapo, P. O., 1999, Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration: *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 4, no. 2, p. 135-143.
- Guzman del pino, J. L., y Baena Perez, J., 1978, Mapa geológico de españa-930: Puebla de don fadrique: Instituto Geológico y Minero de España (IGME), scale 1:50000.
- Harvey, A. M., 2007, High sinuosity bedrock channels response to rapid incision : Examples in se Spain *Cuaternario y Geomorfología*, v. 21, no. 3-4, p. 21-47.
- Hassan, F. A., 1997, Holocene palaeoclimates of africa: *African Archaeological Review*, v. 14, no. 4, p. 213-230.
- Heritage, G., y Hetherington, D., 2007, Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 32, no. 1, p. 66-74.
- Herrera, S., Fita, L., Fernandez, J., y Gutierrez, J. M., 2010, Evaluation of the mean and extreme precipitation regimes from the ensembles regional climate multimodel simulations over Spain: *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, v. 115.
- Hertig, E., y Jacobeit, J., 2008a, Assessments of mediterranean precipitation changes for the 21st century using statistical downscaling techniques: *International journal of climatology*, v. 28, no. 8, p. 1025-1045.
- , 2008b, Downscaling future climate change: Temperature scenarios for the mediterranean area: *Global and Planetary Change*, v. 63, no. 2-3, p. 127-131.
- Hertig, E., Seubert, S., y Jacobeit, J., 2010, Temperature extremes in the mediterranean area: Trends in the past and assessments for the future: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 10, no. 10, p. 2039-2050.
- Hewitson, B. C., y Crane, R. G., 1996, Climate downscaling: Techniques and application: *Climate Research*, v. 7, no. 2, p. 85-95.
- Hidalgo-Munoz, J. M., Argueso, D., Gamiz-Fortis, S. R., Esteban-Parra, M. J., y Castro-Diez, Y., 2011, Trends of extreme precipitation and associated synoptic patterns over the southern iberian peninsula: *Journal of Hydrology*, v. 409, no. 1-2, p. 497-511.
- Hoffman, M. T., y Rohde, R. F., 2007, From pastoralism to tourism: The historical impact of changing land use practices in namaqualand: *Journal of Arid Environments*, v. 70, no. 4, p. 641-658.
- Hooke, J. M., y Mant, J. M., 2000, Geomorphological impacts of a flood event on ephemeral channels in se Spain: *Geomorphology*, v. 34, no. 3-4, p. 163-180.
- Hopf, M., 1966, *Triticum monococcum* y *triticum dicoccum* en el neolítico antiguo español: *Archivo de Prehistoria Levantina*, Valencia, v. XI, p. 53-73.
- Horton, R. E., 1945, Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology: *Geological Society of America Bulletin*, v. 56, no. 3, p. 275-370.
- Hourdin, F., Musat, I., Bony, S., Braconnot, P., Codron, F., Dufresne, J. L., Fairhead, L., Filiberti, M. A., Friedlingstein, P., Grandpeix, J. Y., Krinner, G., Levan, P., Li, Z. X., y Lott, F., 2006, The lmdz4 general circulation model: Climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection: *Climate Dynamics*, v. 27, no. 7-8, p. 787-813.
- Ibarra-Berastegi, G., Saenz, J., Ezcurra, A., Elias, A., Diaz Argandona, J., y Errasti, I., 2011, Downscaling of surface moisture flux and precipitation in the ebro valley (Spain) using analogues and analogues followed by random forests and multiple linear regression: *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 15, no. 6, p. 1895-1907.
- Iglesias, A., Estrela, T., y Gallart, F., 2005, Impactos sobre los recursos hídricos., *in* Ambiente, M. d. M., ed., Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático, p. 303-353.
- IPCC, 1990, Climate change the IPCC scientific assessment: IPCC.
- , 2007a, Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change: IPCC.
- , 2007b, Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change: IPCC.
- , 2013, Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change: IPCC.
- , 2014, Climate change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability: The working group II (WGII) contribution to the fifth assessment report: IPCC.

- Jacob, D., Barring, L., Christensen, O. B., Christensen, J. H., de Castro, M., Deque, M., Giorgi, F., Hagemann, S., Lenderink, G., Rockel, B., Sanchez, E., Schar, C., Seneviratne, S. I., Somot, S., van Ulden, A., y van den Hurk, B., 2007, An inter-comparison of regional climate models for europe: Model performance in present-day climate: *Climatic Change*, v. 81, p. 31-52.
- Jalut, G., Dedoubat, J. J., Fontugne, M., y Otto, T., 2009, Holocene circum-mediterranean vegetation changes: Climate forcing and human impact: *Quaternary International*, v. 200, no. 1-2, p. 4-18.
- Jalut, G., Esteban Amat, A., Bonnet, L., Gauquelin, T., y Fontugne, M., 2000, Holocene climatic changes in the western mediterranean, from south-east france to south-east spain: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 160, no. 3-4, p. 255-290.
- Jetten, V., Govers, G., y Hessel, R., 2003, Erosion models: Quality of spatial predictions: *Hydrological Processes*, v. 17, no. 5, p. 887-900.
- Jiménez Navarro, E., 1962, Excavaciones en cueva de ambrosio: *Noticiario Arqueológico Hispánico*, Madrid., p. 13-48.
- Johns, T. C., Durman, C. F., Banks, H. T., Roberts, M. J., McLaren, A. J., Ridley, J. K., Senior, C. A., Williams, K. D., Jones, A., Rickard, G. J., Cusack, S., Ingram, W. J., Crucifix, M., Sexton, D. M. H., Joshi, M. M., Dong, B. W., Spencer, H., Hill, R. S. R., Gregory, J. M., Keen, A. B., Pardaens, A. K., Lowe, J. A., Bodas-Salcedo, A., Stark, S., y Searl, Y., 2006, The new hadley centre climate model (hadgem1): Evaluation of coupled simulations: *Journal of Climate*, v. 19, no. 7, p. 1327-1353.
- Johns, T. C., Gregory, J. M., Ingram, W. J., Johnson, C. E., Jones, A., Lowe, J. A., Mitchell, J. F. B., Roberts, D. L., Sexton, D. M. H., Stevenson, D. S., Tett, S. F. B., y Woodage, M. J., 2003, Anthropogenic climate change for 1860 to 2100 simulated with the hadcm3 model under updated emissions scenarios: *Climate Dynamics*, v. 20, no. 6, p. 583-612.
- Johnstone, E., Macklin, M. G., y Lewin, J., 2006, The development and application of a database of radiocarbon-dated holocene fluvial deposits in great britain: *CATENA*, v. 66, no. 1-2, p. 14-23.
- Jungclaus, J. H., Keenlyside, N., Botzet, M., Haak, H., Luo, J. J., Latif, M., Marotzke, J., Mikolajewicz, U., y Roeckner, E., 2006, Ocean circulation and tropical variability in the coupled model echam5/mpiom: *Journal of Climate*, v. 19, no. 16, p. 3952-3972.
- Junta_de_Andalucía, 2003, Metodología para la elaboración de una cartografía de vegetación y usos del suelo a escala 1:25.000 de andalucía, *in* Consejería de medio ambiente, J. d. A., ed.: Sevilla, Junta de andalucía, p. 26.
- , 2012, Población proyectada por zonas de trabajo social según sexo, andalucía, 2009-2035, Volume 2013: Sevilla, Instituto de Estadística y cartografía de andalucíaConsejería de economía innovación ciencia y empleo, p. La Proyección de la población de Andalucía por ambitos subregionales 2009 - 2035 ofrece datos desagregados por sexo y edad en diversas zonificaciones usadas por la Administración Pública andaluza. .
- K-1_model_developers, 2004, K-1 coupled model (miroc) description, k-1 technical report: Center for Climate System Research, University of Tokyo.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., y Joseph, D., 1996, The ncep/ncar 40-year reanalysis project: *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 77, no. 3, p. 437-471.
- Kim, S. J., Flato, G. M., y Boer, G. J., 2003, A coupled climate model simulation of the last glacial maximum, part 2: Approach to equilibrium: *Climate Dynamics*, v. 20, no. 6, p. 635-661.
- Kim, S. J., Flato, G. M., Boer, G. J., y McFarlane, N. A., 2002, A coupled climate model simulation of the last glacial maximum, part 1: Transient multi-decadal response: *Climate Dynamics*, v. 19, no. 5-6, p. 515-537.
- Kioutsioukis, I., Melas, D., y Zanis, P., 2008, Statistical downscaling of daily precipitation over greece: *International journal of climatology*, v. 28, no. 5, p. 679-691.
- Kirkby, M. J., Jones, R. J. A., Irvine, B., Gobin, A., Govers, G., Cerdan, O., Van Rompaey, A., Le Bissonnais, Y., Daroussin, J., King, D., Montanarella, L., Grimm, M., Vieillefont, V., Puigdefabregas, J., Boer, M., Kosmas, C., Yassoglou, N., Tsara, M., Mantel, S., Van Lynden, G. J., y Huting, J., 2004, Pan-european soil erosion risk assessment: The pesera map, version 1 october 2003. Explanation of special publication ispra 2004 no.73 (s.P.I.04.73). Office for Official Publications of the European Communities.

- Klein Tank, A., y Konnen, G. P., 2003, Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in europe, 1946-99: *Journal of Climate*, v. 16, no. 22, p. 3665-3680.
- Knisel, W. G., 1980, Creams a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems, *in* Agriculture, U. S. D. o., ed., Volume I: Tucson, AZ, Science and Education Administration, p. 640pp.
- Knox, J. C., 2000, Sensitivity of modern and holocene floods to climate change: *Quaternary Science Reviews*, v. 19, no. 1-5, p. 439-457.
- Kostopoulou, E., y Jones, P. D., 2007, Comprehensive analysis of the climate variability in the eastern mediterranean. Part ii: Relationships between atmospheric circulation patterns and surface climatic elements: *International journal of climatology*, v. 27, no. 10, p. 1351-1371.
- Kundzewicz, Z. W., y Schellnhuber, H. J., 2004, Floods in the ipcc tar perspective: *Natural Hazards*, v. 31, no. 1, p. 111-128.
- Laguna, A., y Giráldez, J. V., 1993, The description of soil erosion through a kinematic wave model: *Journal of Hydrology*, v. 145, no. 1-2, p. 65-82.
- Lasanta, T., 1989, Evolución reciente de la agricultura de montaña: El pirineo aragonés, Logroño, Spain, *Geoforma*.
- Legutke, S., Voss, R., Klimarechenzentrum, D., y Betreuungsgruppe, M., 1999, The hamburg atmosphere-ocean coupled circulation model echo-g: *Deutsches Klimarechenzentrum*, 0940-9327
- Lentisco Puche, J. D., 1985, Prensa velezana, 1876-1920.: *Revista Velezana*, v. 4, p. 29-44.
- , 1995, El parque natural de sierra maría los vélez, Velez-Rubio, Almeria, *Revista Velezana*, 95 p.:
- , 1996, De despensa agrícola a recurso turístico. Evolución y transformación del monte velezano, siglos xvi-xx *in* Universidad de Almería, S. d. P., ed., *Historia y medio ambiente en el territorio almeriense*: Almeria, p. 203-220.
- Leonard, R. A., Knisel, W. G., Truman, C. C., y Davis, F. M., 1991, The gleams model-a computer tool for evaluating agrochemical fate: *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, v. 201, p. 93-AGRO.
- Lesschen, J. P., Cammeraat, L. H., y Nieman, T., 2008, Erosion and terrace failure due to agricultural land abandonment in a semi-arid environment: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 33, no. 10, p. 1574-1584.
- Lichti, D. D., Gordon, S. J., y Tipdecho, T., 2005, Error models and propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner networks: *Journal of Surveying Engineering-Asce*, v. 131, no. 4, p. 135-142.
- Liquete, C., Canals, M., Ludwig, W., y Arnau, P., 2009, Sediment discharge of the rivers of catalonia, ne spain, and the influence of human impacts: *Journal of Hydrology*, v. 366, no. 1-4, p. 76-88.
- Lopez-Bermudez, F., 1990, Soil-erosion by water on the desertification of a semiarid mediterranean fluvial basin - the segura basin, spain: *Agriculture Ecosystems & Environment*, v. 33, no. 2, p. 129-145.
- López-Bermúdez, F., Barberá, G. G., Sarria, F. A., y Serrato, F. B., 2002, Natural resources in the guadalentín basin (south-east spain)water as a key factor *in* Sons, J. W., ed., *Mediterranean desertification: A mosaic of processes and responses*, p. 233-245.
- López-Bermúdez, F., Hervás, F. N., Salas, M. E. M., Calvo, F. B., Egea, A. C., Martínez, J. C., Pérez, C. F., López, L. G., Alcaraz, T. O., Fernández, J. P., y Alcázar, M. V., 1978, Inundaciones catastróficas, precipitaciones torrenciales y erosión en la provincia de murcia: *Papeles del Departamento de Geografía*, v. 8, p. 49-91.
- Lorca, C. o., 2010, Fotos antiguas de lorca, Volume 2013: <http://ciudaddeLorca.blogspot.com.es/2010/09/fotos-antiguas-de-lorca.html>, City o Lorca.
- Llorens, P., y Domingo, F., 2007, Rainfall partitioning by vegetation under mediterranean conditions. A review of studies in europe: *Journal of Hydrology*, v. 335, no. 1-2, p. 37-54.
- Llorens, P., Poch, R., Latron, J., y Gallart, F., 1997, Rainfall interception by a pinus sylvestris forest patch overgrown in a mediterranean mountainous abandoned area i. Monitoring design and results down to the event scale: *Journal of Hydrology*, v. 199, no. 3-4, p. 331-345.
- Macklin, M. G., Benito, G., Gregory, K. J., Johnstone, E., Lewin, J., Michczyńska, D. J., Soja, R., Starkel, L., y Thorndycraft, V. R., 2006, Past hydrological events reflected in the holocene fluvial record of europe: *CATENA*, v. 66, no. 1-2, p. 145-154.
- Machado, M. J., Benito, G., Barriendos, M., y Rodrigo, F. S., 2011, 500 years of rainfall variability and extreme hydrological events in southeastern spain drylands: *Journal of Arid Environments*, v. 75, no. 12, p. 1244-1253.

- Madariaga, J. A. d., 1898, Datos de las avenidas en los ríos segura y guadalentin con motivo de los temporales de enero de 1898: Montes, v. XXII, no. 512,513, p. 236-241, 265-268.
- Maraun, D., Osborn, T., y Rust, H., 2011, The influence of synoptic airflow on uk daily precipitation extremes. Part i: Observed spatio-temporal relationships: Climate Dynamics, v. 36, no. 1-2, p. 261-275.
- Marks, K., y Bates, P., 2000, Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models: Hydrological Processes, v. 14, no. 11-12, p. 2109-2122.
- Martin-Rosales, W., Pulido-Bosch, A., Gisbert, J., y Vallejos, A., 2003, Sediment yield estimation and check dams in a semiarid area (sierra de gador, southern spain), *in* DeBoer, D. H. F. W. M. T. P. A., ed., Erosion prediction in ungauged basins: Integrating methods and techniques: Oxford, IAHS, p. 51-58.
- Martin, G. M., Ringer, M. A., Pope, V. D., Jones, A., Dearden, C., y Hinton, T. J., 2006, The physical properties of the atmosphere in the new hadley centre global environmental model (hadgem1). Part i: Model description and global climatology: Journal of Climate, v. 19, no. 7, p. 1274-1301.
- Martínez-López, C., 1988, Vélez blanco : Nazarita y castellano, Almería, Instituto de Estudios Almerienses
- Martínez-Mena, M., Castillo, V., y Albaladejo, J., 2001, Hydrological and erosional response to natural rainfall in a semi-arid area of south-east spain: Hydrological Processes, v. 15, no. 4, p. 557-571.
- Martínez Artero, J. A., 2001, Repoblaciones hidrológico-forestales en la cuenca del río guadalentín: Montes, v. N° 65, p. 66-69.
- Martínez García, J., 1994, Arqueología y prehistoria en la comarca de los vélez (almería): Del paleolítico al neolítico, *in* Almerienses, I. d. e., ed., Arqueología en la comarca de los vélez (almería): Homenaje al profesor miguel guirao gea, Volume 1: Almería, Instituto de Estudios Almerienses, p. 31-54.
- Martínez García, J., Blanco de la Rubia, I., y Mellado Sáez, C., Aproximación al horizonte neolítico al aire libre, del cerro de los lópez (vélez-rubio, almería), *in* Proceedings). I Encuentro de Cultura Mediterránea. Hom. Padre Tapia, 1986, Almería, 1988, p. 58-68.
- Martínez López, C., y Muñoz, F., 1994, Ciudades o villae. Debates sobre la historia ibero-romana de los vélez., *in* Almerienses, R. V. V. R. y. I. d. E., ed., Arqueología en la comarca de los vélez (almería) : Homenaje al profesor miguel guirao gea Almería, p. 195.
- Martínez López, C., y Muñoz Muñoz, F., 1987, Memoria sobre las prospecciones arqueológicas de superficie de los yacimientos ibéricos y romanos de la comarca de los vélez (almería). Fase ii : Hoya del marqués-cueva ambrosio-río alcaide., p. 82.
- , 1999, Poblamiento ibérico y romano en el sureste peninsular: La comarca de los vélez, almería, Universidad de granada, 309 p.:
- Masachs Alavedra, V., 1948, El régimen de los ríos peninsulares, Barcelona, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 593 p.:
- Masana, E., Martínez-Díaz, J. J., Hernández-Enrile, J. L., y Santanach, P., 2004, The alhama de murcia fault (se spain), a seismogenic fault in a diffuse plate boundary: Seismotectonic implications for the ibero-magrebian region: Journal of Geophysical Research: Solid Earth, v. 109, no. B1, p. B01301.
- Meyer, C. R., Wagner, L. E., Yoder, D. C., y Flanagan, D. C., 2001, The modular soil erosion system (moses), St Joseph, Amer Soc Agr Engineers, Soil erosion research for the 21st century, proceedings, 358-361 p.:
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, P. Y. A., 1976a, Orce (granada). Mapa de cultivos y aprovechamientos hoja nº 951 MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN, scale 1:50000, digital.
- , 1976b, Puebla de don fadrique (granada). Mapa de cultivos y aprovechamientos hoja nº 930 MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN, scale 1:50000, digital.
- , 1976c, Vélez-blanco (murcia). Mapa de cultivos y aprovechamientos hoja nº 952 MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN, scale 1:50000, digital.
- , 1976d, Zarcilla de ramos (murcia). Mapa de cultivos y aprovechamientos hoja nº 931: MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN, scale 1:50000, digital.
- Mira, F., 1909, División hidrológico-forestal del segura. Reseña de los trabajos efectuados hasta fin del año 1907: Montes, v. XXXIII, no. 767,768, p. 10-14, 37-41.
- Montiel Pinilla, F., 1948, El problema forestal de la cuenca del segura en su relación con las inundaciones: Montes, v. 24, p. 527-533.

- , 1953, El problema forestal de la cuenca del segura en su relación con las inundaciones: *Montes*, v. 53, p. 407-413.
- , 1955, La lucha contra la erosión en la cuenca del río segura: *Montes*, v. Nº 65, p. 349-354.
- Moran-Tejeda, E., Ceballos-Barbancho, A., y Llorente-Pinto, J. M., 2010, Hydrological response of mediterranean headwaters to climate oscillations and land-cover changes: The mountains of duero river basin (central spain): *Global and Planetary Change*, v. 72, no. 1-2, p. 39-49.
- Moreno Cayuela, F., 1983, Las aguas del mahimón-sierra de maría. Recursos y posibilidades de aprovechamiento en la vega de los vélez.: *Revista Velezana*, v. 2, p. 67-76.
- Morgan, R. P. C., 2001, A simple approach to soil loss prediction: A revised morgan-morgan-finney model: *CATENA*, v. 44, no. 4, p. 305-322.
- Morgan, R. P. C., Quinton, J. N., Smith, R. E., Govers, G., Poesen, J. W. A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., y Styczen, M. E., 1998, The european soil erosion model (eurosem): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 23, no. 6, p. 527-544.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., y Veith, T. L., 2007, Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations: *Transactions of the Asabe*, v. 50, no. 3, p. 885-900.
- Motovilov, Y. G., Gottschalk, L., Engeland, K., y Rodhe, A., 1999, Validation of a distributed hydrological model against spatial observations: *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 98-9, p. 257-277.
- Munoz-Diaz, D., y Rodrigo, F. S., 2006, Seasonal rainfall variations in spain (1912-2000) and their links to atmospheric circulation: *Atmospheric Research*, v. 81, no. 1, p. 94-110.
- Muñoz Bravo, J., 1989, Enseñanza de las avenidas históricas en la cuenca del segura, *in* Gil-Olzina, A. a. M.-G., A., ed., *A venidas fluviales e inundaciones en la cuenca del mediterráneo*: Murcia, Instituto Universitario de Geografía de la Universidad de Alicante/C.A.M., p. 459-467.
- Musso y Fontés, J., 1847, Historia de los riegos de lorca, de los ríos castril y guardal ó del canal de murcia y de los ojos de archivel *in* Palacios, I. d. J. C., ed.: Murcia, p. 233.
- Nadal-Romero, E., Lasanta, T., y García-Ruiz, J. M., 2013, Runoff and sediment yield from land under various uses in a mediterranean mountain area: Long-term results from an experimental station: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 38, no. 4, p. 346-355.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., Vries, B. d., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Griibler, A., Jung, T. Y., Kram, T., Rovere, E. L. L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., Rooijen, S. v., Victor, N., y Dadi, Z., 2000, Special report on emissions scenarios: A special report of working group iii of the intergovernmental panel on climate change: IPCC.
- Narasimhan, B., Srinivasan, R., Arnold, J. G., y Di Luzio, M., 2005, Estimation of long-term soil moisture using a distributed parameter hydrologic model and verification using remotely sensed data: *Transactions of the Asae*, v. 48, no. 3, p. 1101-1113.
- Nash, J. E., y Sutcliffe, J. V., 1970, River flow forecasting through conceptual models part i — a discussion of principles: *Journal of Hydrology*, v. 10, no. 3, p. 282-290.
- Navarro Hervas, F., y Rodriguez Estrella, T., 1987, Manifestaciones neotectónicas en la comarca de los velezn (ne. De almeria): *Paralelo* 37, v. 11, no. 12, p. 119-134.
- Nieto, S., Frias, M. D., y Rodriguez-Puebla, C., 2004, Assessing two different climatic models and the ncep-ncar reanalysis data for the description of winter precipitation in the iberian peninsula: *International journal of climatology*, v. 24, no. 3, p. 361-376.
- Nuissier, O., Joly, B., Joly, A., Ducrocq, V., y Arbogast, P., 2011, A statistical downscaling to identify the large-scale circulation patterns associated with heavy precipitation events over southern france: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 137, no. 660, p. 1812-1827.
- Nunes, J. P., Vieira, G. N., Seixas, J., Gonclaves, P., y Carvalhais, N., 2005, Evaluating the mefidis model for runoff and soil erosion prediction during rainfall events: *Catena*, v. 61, no. 2-3, p. 210-228.
- Ocharan Ibarra, J. A., 2010, Cueva haizea (vélez blanco) y el arte “significativo”: *Revista Velezana*, v. 29, p. 116-127.
- Onogi, K., Tsutsui, J., Koide, H., Sakamoto, M., Kobayashi, S., Hatsushika, H., Matsumoto, T., Yamazaki, N., Kaalhor, H., Takahashi, K., Kadokura, S., Wada, K., Kato, K., Oyama, R., Ose, T., Mannoji, N., y Taira, R., 2007, The jra-25 reanalysis: *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v. 85, no. 3, p. 369-432.

- Oñate, J. J., Malo, J. E., Suárez, F., y Peco, B., 1998, Regional and environmental aspects in the implementation of spanish agri-environmental schemes: *Journal of Environmental Management*, v. 52, no. 3, p. 227-240.
- Pacific Southwest Inter-agency Committee, W. M. S., 1968, Pacific southwest inter-agency committee : Report of the water management subcommittee on factors affecting sediment yield in the pacific southwest area and selection and evaluation of measures for reduction of erosion and sediment yield, [Washington, D.C.], The Committee.
- Palutikof, J. P., Goodess, C. M., Watkins, S. J., y Holt, T., 2002, Generating rainfall and temperature scenarios at multiple sites: Examples from the mediterranean: *Journal of Climate*, v. 15, no. 24, p. 3529-3548.
- Pardé, M., 1961, Sur la puissance des crues en diverses parties du monde, Zaragoza, CSIC, Geographica.
- Pascual Vera, N., 2005, Murcia y el agua. Historia de una pasión, 240 p.:
- Pauling, A., Luterbacher, J., Casty, C., y Wanner, H., 2006, Five hundred years of gridded high-resolution precipitation reconstructions over europe and the connection to large-scale circulation: *Climate Dynamics*, v. 26, no. 4, p. 387-405.
- Pelegrín Garrido, M. C., 2009, Val de infierno. Una presa bicentenaria (1806-2006): Alberca: *Revista de la Asociación de Amigos del Museo Arqueológico de Lorca*, v. 7, p. 131-142.
- Pelegrín Garrido, M. C., y García Mariana, F. J., Reseña histórica e hidrológica de la presa de valdeinfierno y el manantial de los ojos de luchena (lorca, murcia), *in* Proceedings VII Jornadas Españolas de Presas, Zaragoza, May 29,30 &31 2002 2002, Volume 3.
- Peña, J., Julián, A., Chueca, J., Echeverría, M., y Angeles, G., 2004, Etapas de evolución holocena en el valle del río huerva: Geomorfología y geoarqueología, *in* Peña, J. L., Longares, L. A., y Sánch, M., eds., Geografía física de aragón. Aspectos generales y temáticos: Zaragoza, Universidad de Zaragoza e Institución Fernando el Católico.
- Peña, J. L., Echeverría, M. T., Chueca, J., y Julián, A., 2000, Géomorphologiques d'accumulation et incision pendant l'antiquité classique et ses rapport avec l'activité humaine et les changements climatiques holocènes dans la vallée de la huerva (bassin de l'ébre, espagne), *in* Vermeulen, F., y de Dapper, M., eds., Geoarchaeology of the landscapes of classical antiquity: Leuven, Peeters Publishers, p. 151-159.
- Perez, M. R., 1990, Development of mediterranean agriculture: An ecological approach: *Landscape and Urban Planning*, v. 18, no. 3-4, p. 211-219.
- Poesen, J., Vandekerckhove, L., Nachtergaele, J., Oostwoud Wijdenes, D., Verstraeten, G., y van Wesemael, B., 2002, Gully erosion in dryland environments., *in* Bull, L. J., y Kirkby, M. J., eds., Dryland rivers: Hydrology and geomorphology of semi-arid channels.: Chichester, UK, Wiley, p. 229-262.
- Pons, A., y Reille, M., 1988, The holocene- and upper pleistocene pollen record from padul (granada, spain): A new study: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 66, no. 3-4, p. 243-263.
- Pope, V. D., Gallani, M. L., Rowntree, P. R., y Stratton, R. A., 2000, The impact of new physical parametrizations in the hadley centre climate model: Hadam3: *Climate Dynamics*, v. 16, no. 2-3, p. 123-146.
- Puigdefabregas, J., Sole, A., Gutierrez, L., del Barrio, G., y Boer, M., 1999, Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: Results from the rambla honda field site in southeast spain: *Earth-Science Reviews*, v. 48, no. 1-2, p. 39-70.
- Pujalte, A. P., Naturaleza, I. N. p. I. C. d. I., Espanya. Ministerio de Agricultura, P. y A., Zaidín, E. E. d., y Científicas, C. S. d. I., 1990, Orce - 951: Proyecto lucdeme : Mapa de suelos. (escala 1:100.000), Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.
- , 1993, Velez blanco - 952: Proyecto lucdeme : Mapa de suelos. (escala 1:100.000), Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.
- Pujante Martínez, A., 2002, El castillo de puentes y las alquerías de su entorno: Aproximación a la estructura del poblamiento: Alberca: *Revista de la Asociación de Amigos del Museo Arqueológico de Lorca*, v. 1, p. 57-84.
- Puricelli, M., 2003, Estimación y distribución de parámetros del suelo para la modelización hidrológica [PhD book]: Universidad Politécnica de Valencia, 434 p.
- Ramanarayanan, T. S., Williams, J. R., Dugas, W. A., Hauck, L. M., y McFarland, A. M. S., 1997, Using apex to identify alternative practices for animal waste management, ASAE Meeting Presentation., Volume No: 97-2209, p. 36.

- Ramos, M. C., 2001, Rainfall distribution patterns and their change over time in a mediterranean area: Theoretical and Applied Climatology, v. 69, no. 3-4, p. 163-170.
- Refshaard, J., y Storm, B., 1995, Mike she, *in* Singh, V., ed., Computer models of watershed hydrology.: Ann Arbor, MI, Water Resources Publications, p. 809-846.
- Reimer, P. J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P. G., Bronk Ramsey, C., Buck, C. E., Cheng, H., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Haflidason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T. J., Hoffmann, D. L., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kaiser, K. F., Kromer, B., Manning, S. W., Niu, M., Reimer, R. W., Richards, D. A., Scott, E. M., Southon, J. R., Staff, R. A., Turney, C. S. M., y van der Plicht, J., 2013, Intcal13 and marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal bp, 2013.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., y Porter, J. P., 1991, Rusle - revised universal soil loss equation: Journal of Soil and Water Conservation, v. 46, no. 1, p. 30-33.
- Renschler, C. S., y Harbor, J., 2002, Soil erosion assessment tools from point to regional scales--the role of geomorphologists in land management research and implementation: Geomorphology, v. 47, no. 2-4, p. 189-209.
- Revuelto, R. M. L., 2012, The recent demographic dynamics in the sierra morena of córdoba: La dinámica demográfica reciente en la Sierra Morena Cordobesa, no. 95, p. 121-147.
- Reyes, E. d. l., 1900, Pantanos y repoblaciones: Montes, v. XXIV, no. 573, p. 624-629.
- Rigon, R., D'Odorico, P., y Bertoldi, G., 2011, The geomorphic structure of the runoff peak: Hydrology and Earth System Sciences, v. 15, no. 6, p. 1853-1863.
- Ringer, M. A., Martin, G. M., Greeves, C. Z., Hinton, T. J., James, P. M., Pope, V. D., Scaife, A. A., Stratton, R. A., Inness, P. M., Slingo, J. M., y Yang, G. Y., 2006, The physical properties of the atmosphere in the new hadley centre global environmental model (hadgem1). Part ii: Aspects of variability and regional climate: Journal of Climate, v. 19, no. 7, p. 1302-1326.
- Ripoll López, S., El solutrense andaluz. Nuevas aportaciones, *in* Proceedings Actas Congr. Inter. Estrecho de Gibraltar, Ceuta, 1987, p. 111-129.
- , 1990, Les industries solutréennes de la cueva de ambrosio (vélez-blanco, sud-est de l'espagne) et leur rapport avec les sources de matière première: Cahiers du Quaternaire, v. 17, p. 471-477.
- Rodrigo, F. S., 2010, Changes in the probability of extreme daily precipitation observed from 1951 to 2002 in the iberian peninsula: International journal of climatology, v. 30, no. 10, p. 1512-1525.
- Rodrigo, F. S., y Barriendos, M., 2008, Reconstruction of seasonal and annual rainfall variability in the iberian peninsula (16th–20th centuries) from documentary data: Global and Planetary Change, v. 63, no. 2–3, p. 243-257.
- Rodrigo, F. S., y Trigo, R. M., 2007, Trends in daily rainfall in the iberian peninsula from 1951 to 2002: International journal of climatology, v. 27, no. 4, p. 513-529.
- Rodríguez-Pascua, M. A., 2005, Estudios paleosismológicos en españa: Una revisión: Boletín Geológico y Minero, v. 116, no. 3, p. 203-216.
- Rodríguez-Puebla, C., Encinas, A., García-Casado, L., y Nieto, S., 2010, Trends in warm days and cold nights over the iberian peninsula: Relationships to large-scale variables: Climatic Change, v. 100, no. 3-4, p. 667-684.
- Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Kornbluh, L., Manzini, E., Rhodin, A., Schlese, U., Schulzweida, U., y Tompkins, A., 2003, The atmospheric general circulation model echam 5. Part i: Model description.
- Romero-Díaz, A., Alonso-Sarriá, F., y Martínez-Lloris, M., 2007, Erosion rates obtained from check-dam sedimentation (se spain). A multi-method comparison: CATENA, v. 71, no. 1, p. 172-178.
- Romero-Díaz, A., Belmonte-Serrato, F., y Ruiz-Sinoga, J. D., 2010, The geomorphic impact of afforestations on soil erosion in southeast spain: Land Degradation & Development, v. 21, no. 2, p. 188-195.
- Romero-Díaz, A., Sinoga, J. D. R., y Serrato, F. B., 2011, Hydric erosion rates in the region of murcia: Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, no. 56, p. 129-153.
- Romero-Díaz, M. A., Cabezas, F., y Bermudez, F. L., 1992, Erosion and fluvial sedimentation in the river segura basin (spain): Catena, v. 19, no. 3-4, p. 379-392.
- Romero Díaz, A., y Maurandi Guirado, A., 2000, Las inundaciones en la cuenca del segura en las dos últimas décadas del siglo xx: Actuaciones de prevención: Serie geográfica, v. 9, p. 93-120.
- Roth, D., 2008, Vélez-blanco en el sigloxvi. Desde la época morisca a la sociedad de la repoblación, Almeria, Centro de Estudios Velezanos. Fundación Horstmann. Instituto de estudios Almerienses.

- Ruiz-Flaño, P., García-Ruiz, J. M., y Ortigosa, L., 1992, Geomorphological evolution of abandoned fields. A case study in the central pyrenees: CATENA, v. 19, no. 3–4, p. 301-308.
- Russell, G. L., Miller, J. R., y Rind, D., 1995, A coupled atmosphere-ocean model for transient climate change studies: Atmosphere-Ocean, v. 33, no. 4, p. 683-730.
- Sagasti, A., y Madoz, P., 1845-1850, Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de ultramar, Editoriales Andaluzas Unidas.
- Sáinz, L. G., Luis; Maluquer, Manuel, 1897, Pantano de puentes (murcia). Revista de Obras Públicas, v. 1132, p. 3.
- Salas, L. d., 2004, Regionalización de leyes idf para el uso de modelos hidrometeorológicos de estimación de caudales [PhD Thesis: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal, 273 pp. p.
- Saleh, A., Arnold, J. G., Gassman, P. W., Hauck, L. M., Rosenthal, W. D., Williams, J. R., y McFarland, A. M. S., 2000, Application of swat for the upper north bosque river watershed: Transactions of the Asae, v. 43, no. 5, p. 1077-1087.
- Saleh, A., y Du, B., 2004, Evaluation of swat and hspf within basins program for the upper north bosque river watershed in central texas: Transactions of the Asae, v. 47, no. 4, p. 1039-1049.
- Sánchez-Gómez, M., Martínez-Sánchez, C., García-García, F., Peláez, J. A., Pérez-Valera, F., Martínez-Andreu, M., y Pérez-Valera, L. A., 2011, Evidence for a 4700–2100 bc palaeoearthquake recorded in a fluvial-archaeological sequence of the segura river, se spain: Quaternary International, v. 242, no. 1, p. 106-114.
- Sánchez, Á. V., Díaz-Fernández, P., Valdés, C. M., y Sánchez, L. G., 2002, La transformación histórica del paisaje forestal en la región de murcia. Tercer inventario forestal nacional 1997-2006, Madrid, 296pp. p.:
- Sánchez Picón, A., 1996, Historia y medio ambiente en el territorio almeriense, Almería, 369 p.:
- Sancho, C., Peña, J. L., Muñoz, A., Benito, G., McDonald, E., Rhodes, E. J., y Longares, L. A., 2008, Holocene alluvial morphopedosedimentary record and environmental changes in the bardenas reales natural park (ne spain): CATENA, v. 73, no. 3, p. 225-238.
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., y Hauck, L. M., 2001, Validation of the swat model on a large river basin with point and nonpoint sources: Journal of the American Water Resources Association, v. 37, no. 5, p. 1169-1188.
- Sanz Montero, M. E., Avedaño Salas, C., Cobo, R., y R., G., 1998, Determinación de la erosión en la cuenca del segura a partir de los sedimentos acumulados en sus embalses: Geogaceta, v. 23, p. 4.
- Sardon, E., Rius, A., y Zarraoa, N., 1994, Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron-content from global positioning system observations: Radio Science, v. 29, no. 3, p. 577-586.
- Satalich, J., y Ricketson, R., 1998, Field test of trimble 4000 real-time kinematic gps survey system: Journal of Surveying Engineering-Asce, v. 124, no. 1, p. 40-48.
- Saxton, K. E., y Rawls, W. J., 2006, Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions: Soil Science Society of America Journal, v. 70, no. 5, p. 1569-1578.
- Schmidt, G. A., Ruedy, R., Hansen, J. E., Aleinov, I., Bell, N., Bauer, M., Bauer, S., Cairns, B., Canuto, V., Cheng, Y., Del Genio, A., Faluvegi, G., Friend, A. D., Hall, T. M., Hu, Y. Y., Kelley, M., Kiang, N. Y., Koch, D., Lacis, A. A., Lerner, J., Lo, K. K., Miller, R. L., Nazarenko, L., Oinas, V., Perlwitz, J., Rind, D., Romanou, A., Russell, G. L., Sato, M., Shindell, D. T., Stone, P. H., Sun, S., Tausnev, N., Thresher, D., y Yao, M. S., 2006, Present-day atmospheric simulations using giss modele: Comparison to in situ, satellite, and reanalysis data: Journal of Climate, v. 19, no. 2, p. 153-192.
- Schmidt, J., Von Werner, M., y Michael, A., 1999, Application of the erosion 3d model to the catsop watershed, the netherlands: Catena, v. 37, no. 3-4, p. 449-456.
- Schulte, L., 2002, Climatic and human influence on river systems and glacier fluctuations in southeast spain since the last glacial maximum: Quaternary International, v. 93-94, no. 0, p. 85-100.
- Segui, P. Q., Ribes, A., Martin, E., Habets, F., y Boe, J., 2010, Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of mediterranean basins: Journal of Hydrology, v. 383, no. 1-2, p. 111-124.
- Sheffer, N. A., Enzel, Y., Benito, G., Grodek, T., Poart, N., Lang, M., Naulet, R., y Coeur, D., 2003, Paleofloods and historical floods of the ardeche river, france: Water Resources Research, v. 39, no. 12, p. 13.

- Silva, P., 1994, Evolución geodinámica de la depresión del guadalentín: [PhD: Universidad Complutense de Madrid.
- Silva, P., Goy, J. L., Zazo, C., y T. Bardají, 1996, Evolución reciente del drenaje en la depresión del guadalentín (murcia, se españa): *Geogaceta*, v. 20, no. 5, p. 1100-1103.
- Silva, P. G., Bardají, T., Calmel-Avila, M., Goy, J. L., y Zazo, C., 2008, Transition from alluvial to fluvial systems in the guadalentín depression (se spain) during the holocene: Lorca fan versus guadalentín river: *Geomorphology*, v. 100, no. 1-2, p. 140-153.
- Silva, P. G., Goy, J. L., Zazo, C., y Bardají, T., 2003, Fault-generated mountain fronts in southeast spain: Geomorphologic assessment of tectonic and seismic activity: *Geomorphology*, v. 50, no. 1-3, p. 203-225.
- Simmons, A. J., Jones, P. D., da Costa Bechtold, V., Beljaars, A. C. M., Kållberg, P. W., Saarinen, S., Uppala, S. M., Viterbo, P., y Wedi, N., 2004, Comparison of trends and low-frequency variability in cru, era-40, and ncep/ncar analyses of surface air temperature: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 109, no. D24, p. D24115.
- Singh, J., Knapp, H. V., Arnold, J. G., y Demissie, M., 2005, Hydrological modeling of the iroquois river watershed using hspf and swat: *Journal of the American Water Resources Association*, v. 41, no. 2, p. 343-360.
- Smith, R. E., Goodrich, D. C., y Quinton, J. N., 1995, Dynamic, distributed simulation of watershed erosion - the kinos2 and eurosem models: *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 50, no. 5, p. 517-520.
- Sorooshian, S., Duan, Q. Y., y Gupta, V. K., 1993, Calibration of rainfall-runoff models - application of global optimization to the sacramento soil-moisture accounting model: *Water Resources Research*, v. 29, no. 4, p. 1185-1194.
- Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., y Teunissen, P., 2011, Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points: *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 66, no. 4, p. 389-399.
- Stehlik, J., y Bardossy, A., 2002, Multivariate stochastic downscaling model for generating daily precipitation series based on atmospheric circulation: *Journal of Hydrology*, v. 256, no. 1-2, p. 120-141.
- Stern, R. D., y Coe, R., 1984, A model-fitting analysis of daily rainfall data: *Journal of the Royal Statistical Society Series a-Statistics in Society*, v. 147, p. 1-34.
- Stokes, M., y Mather, A. E., 2003, Tectonic origin and evolution of a transverse drainage: The río almanzora, betic cordillera, southeast spain: *Geomorphology*, v. 50, no. 1-3, p. 59-81.
- Stoll, S., Franssen, H. J. H., Butts, M., y Kinzelbach, W., 2011, Analysis of the impact of climate change on groundwater related hydrological fluxes: A multi-model approach including different downscaling methods: *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 15, no. 1, p. 21-38.
- Stouffer, R. J., Broccoli, A. J., Delworth, T. L., Dixon, K. W., Gudgel, R., Held, I., Hemler, R., Knutson, T., Lee, H. C., Schwarzkopf, M. D., Soden, B., Spelman, M. J., Winton, M., y Zeng, F., 2006, Gfdl's cm2 global coupled climate models. Part iv: Idealized climate response: *Journal of Climate*, v. 19, no. 5, p. 723-740.
- Sun, Y., Solomon, S., Dai, A., y Portmann, R. W., 2007, How often will it rain?: *Journal of Climate*, v. 20, no. 19, p. 4801-4818.
- Tabary, P., Desplats, J., Do Khac, K., Eideliman, F., Gueguen, C., y Heinrich, J. C., 2007, The new french operational radar rainfall product. Part ii: Validation: *Weather and Forecasting*, v. 22, no. 3, p. 409-427.
- Taguas, E. V., Ayuso, J. L., Pena, A., Yuan, Y., Sanchez, M. C., Giraldez, J. V., y Pérez, R., 2008, Testing the relationship between instantaneous peak flow and mean daily flow in a mediterranean area southeast spain: *CATENA*, v. 75, no. 2, p. 129-137.
- Takken, I., Beuselinck, L., Nachtergaele, J., Govers, G., Poesen, J., y Degraer, G., 1999, Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (lisem): *Catena*, v. 37, no. 3-4, p. 431-447.
- Thoma, D. P., Gupta, S. C., Bauer, M. E., y Kirchoff, C. E., 2005, Airborne laser scanning for riverbank erosion assessment: *Remote Sensing of Environment*, v. 95, no. 4, p. 493-501.
- Thorndycraft, V. R., Benito, G., Rico, M., Sopena, A., Sanchez-Moya, Y., y Casas, A., 2005, A long-term flood discharge record derived from slackwater flood deposits of the llobregat river, ne spain: *Journal of Hydrology*, v. 313, no. 1-2, p. 16-31.

- Thornes, J., Lopez-Bermudez, F., y Woodward, J., 2009, Hydrology, river regimes and sediment yield., *in* Woodward, J., ed., *The physical geography of the mediterranean*, Oxford University Press, p. 229-253.
- Trouet, V., Scourse, J. D., y Raible, C. C., 2012, North atlantic storminess and atlantic meridional overturning circulation during the last millennium: Reconciling contradictory proxy records of nao variability: *Global and Planetary Change*, v. 84-85, no. 0, p. 48-55.
- Universidad_de_Murcia, 1990a, Proyecto lucdeme: Puebla de don fadrique - 930. Mapa de suelos escala 1:100.000, ICONA.
- , 1990b, Proyecto lucdeme: Zarcilla de ramos - 931. Mapa de suelos escala 1:100.000, ICONA.
- Uppala, S. M., KÅllberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., Bechtold, V. D. C., Fiorino, M., Gibson, J. K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G. A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R. P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M. A., Beljaars, A. C. M., Berg, L. V. D., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B. J., Isaksen, I., Janssen, P. A. E. M., Jenne, R., McNally, A. P., Mahfouf, J. F., Morcrette, J. J., Rayner, N. A., Saunders, R. W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K. E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., y Woollen, J., 2005, The era-40 re-analysis: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 131, no. 612, p. 2961-3012.
- Van Liew, M. W., Arnold, J. G., y Garbrecht, J. D., 2003, Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models: *Transactions of the Asae*, v. 46, no. 6, p. 1539-1551.
- Van Oost, K., Govers, G., y Desmet, P., 2000, Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage: *Landscape Ecology*, v. 15, no. 6, p. 577-589.
- Van Rompaey, A., Bazzoffi, P., Jones, R. J. A., y Montanarella, L., 2005, Modeling sediment yields in italian catchments: *Geomorphology*, v. 65, no. 1-2, p. 157-169.
- Van Rompaey, A. J. J., Verstraeten, G., Van Oost, K., Govers, G., y Poesen, J., 2001, Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 26, no. 11, p. 1221-1236.
- Velez, J. J., Puricelli, M., Unzu, F. L., y Frances, F., 2009, Parameter extrapolation to ungauged basins with a hydrological distributed model in a regional framework: *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 13, no. 2, p. 229-246.
- Vera, J. A., 2000, *Geología de españa*, Madrid, Sociedad Geológica de España.
- Verstraeten, G., y Poesen, J., 2001, Modelling the long-term sediment trap efficiency of small ponds: *Hydrological Processes*, v. 15, no. 14, p. 2797-2819.
- Verstraeten, G., Poesen, J., de Vente, J., y Koninckx, X., 2003, Sediment yield variability in spain: A quantitative and semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates: *Geomorphology*, v. 50, no. 4, p. 327-348.
- Villalobos Megía, M., Pérez, E. C., Torres, J. A. A., y Segura, S. L., 1988, Estudio hidrogeológico del término municipal de vélez rubio.: *Revista Velezana*, v. 7, p. 62-66.
- Vita-Finzi, C., 1969, *The mediterranean valleys: Geological changes in historical times*, Cambridge, Cambridge Press, 131 p.:
- Wainwright, J., 1996, Infiltration, runoff and erosion characteristics of agricultural land in extreme storm events, se france: *Catena*, v. 26, no. 1-2, p. 27-47.
- Walling, D. E., 1983, The sediment delivery problem: *Journal of Hydrology*, v. 65, no. 1-3, p. 209-237.
- Washington, W. M., Weatherly, J. W., Meehl, G. A., Semtner, A. J., Bettge, T. W., Craig, A. P., Strand, W. G., Arblaster, J., Wayland, V. B., James, R., y Zhang, Y., 2000, Parallel climate model (pcm) control and transient simulations: *Climate Dynamics*, v. 16, no. 10-11, p. 755-774.
- Wijdenes, D. J. O., Poesen, J., Vandekerckhove, L., y Ghesquiere, M., 2000, Spatial distribution of gully head activity and sediment supply along an ephemeral channel in a mediterranean environment: *Catena*, v. 39, no. 3, p. 147-167.
- Wilby, R., Charles, S., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., y Mearns, L. O., 2004, Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods: IPCC.
- Williams, J. R., Renard, K. G., y Dyke, P. T., 1983, Epic: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity: *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 38, no. 5, p. 381-383.
- Wischmeier, W. H., Johnson, C. B., y Cross, B. V., 1971, A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites.: *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 26, no. 5, p. 189-192.

- Wischmeier, W. H., y Smith, D. D., 1978, Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning: Beltsville, Maryland, USA, US Department of Agriculture, p. 69.
- Wittenberg, A. T., Rosati, A., Lau, N. C., y Ploshay, J. J., 2006, Gfcl's cm2 global coupled climate models. Part iii: Tropical pacific climate and enso: *Journal of Climate*, v. 19, no. 5, p. 698-722.
- Woodward, D. E., 1999, Method to predict cropland ephemeral gully erosion: *Catena*, v. 37, no. 3-4, p. 393-399.
- Xoplaki, E., Gonzalez-Rouco, J. F., Luterbacher, J., y Wanner, H., 2004, Wet season mediterranean precipitation variability: Influence of large-scale dynamics and trends: *Climate Dynamics*, v. 23, no. 1, p. 63-78.
- Yan, Z., Bate, S., Chandler, R. E., Isham, V., y Wheeler, H., 2002, An analysis of daily maximum wind speed in northwestern europe using generalized linear models: *Journal of Climate*, v. 15, no. 15, p. 2073-2088.
- Yan, Z., Bate, S., Chandler, R. E., Isham, V., y Wheeler, H., 2006, Changes in extreme wind speeds in nw europe simulated by generalized linear models: *Theoretical and Applied Climatology*, v. 83, no. 1-4, p. 121-137.
- Yang, C., Chandler, R. E., Isham, V. S., y Wheeler, H. S., 2005, Spatial-temporal rainfall simulation using generalized linear models: *Water Resources Research*, v. 41, no. 11, p. W11415.
- Yapo, P. O., Gupta, H. V., y Sorooshian, S., 1996, Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: Sensitivity to calibration data: *Journal of Hydrology*, v. 181, no. 1-4, p. 23-48.
- Yu, Y., Yu, R., Zhang, X., y Liu, H., 2002, A flexible coupled ocean-atmosphere general circulation model: *Advances in Atmospheric Sciences*, v. 19, no. 1, p. 169-190.
- Yu, Y., Zhang, X., y Guo, Y., 2004, Global coupled ocean-atmosphere general circulation models in lasg/iap: *Advances in Atmospheric Sciences*, v. 21, no. 3, p. 444-455.
- Yukimoto, S., y Noda, A., 2002, Improvements of the meteorological research institute global ocean-atmosphere coupled gcm (mri-cgcm2) and its climate sensitivity: *National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan*, p. 37-44.
- Yukimoto, S., Noda, A., Kitoh, A., Hosaka, M., Yoshimura, H., Uchiyama, T., Shibata, K., Arakawa, O., y Kusunoki, S., 2006, Present-day climate and climate sensitivity in the meteorological research institute coupled gcm version 2.3 (mri-cgcm2.3): *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v. 84, no. 2, p. 333-363.
- Yukimoto, S., Noda, A., Kitoh, A., Sugi, M., Kitamura, Y., Hosaka, M., Shibata, K., Maeda, S., y Uchiyama, T., 2001, The new meteorological research institute coupled gcm(mri-cgcm 2)- model climate and variability: *Papers in Meteorology and Geophysics*, v. 51, no. 2, p. 47-88.
- Zazo, C., Dabrio, C. J., Goy, J. L., Lario, J., Cabero, A., Silva, P. G., Bardají, T., Mercier, N., Borja, F., y Roquero, E., 2008, The coastal archives of the last 15ka in the atlantic-mediterranean spanish linkage area: Sea level and climate changes: *Quaternary International*, v. 181, no. 1, p. 72-87.
- Zielhofer, C., y Faust, D., 2008, Mid- and late holocene fluvial chronology of tunisia: *Quaternary Science Reviews*, v. 27, no. 5-6, p. 580-588.
- Zielhofer, C., Faust, D., y Linstädter, J., 2008, Late pleistocene and holocene alluvial archives in the southwestern mediterranean: Changes in fluvial dynamics and past human response: *Quaternary International*, v. 181, no. 1, p. 39-54.

Anexos

Índice de figuras

Figura 1.1: Diagrama de flujo de la metodología simplificada, empleada en los distintos periodos que componen la presente tesis doctoral. A: Registro paleohidrológico (Holoceno), B: Periodo histórico (1863-1971), C: Periodo instrumental (1971-2012), D: Periodo de proyección (2010-2100).	27
Figura 2.1: Situación Geográfica de la cuenca de estudio.....	33
Figura 2.2: Mapa de elevaciones de la cuenca de Valdeinfierno donde se identifica los elementos geográficos más significativos.	34
Figura 2.3: Unidades de comportamiento hidrológico similar determinadas mediante la combinación de los conjuntos litológicos del CEDEX y la simplificación de los mapas geológicos serie MAGNA del IGME, presentes en la cuenca de Valdeinfierno.....	35
Figura 2.4: Tipología de los suelos presentes en la cuenca de Valdeinfierno. Los números indican puntos en los que se ha tomado muestras para el análisis fisicoquímico y se ha elaborado una descripción edafológica.	40
Figura 2.5: Ejemplo del procedimiento de campo para la toma de datos y muestras efectuada para cada uno de los tipos de suelo. Inicialmente se ha descrito el ambiente local del tipo de suelo (A), pendiente media y vegetación. Posteriormente se cava una cata en la que se describe la capa superficial de los suelos (B). Se retira la parte superficial de la zanja para evitar la sobrevaloración de materia orgánica (C). Por último se toma una muestra del suelo para su análisis fisicoquímico (D).	41
Figura 2.6: Imágenes de distintas épocas de la presa de Valdeinfierno. A) Paramento de la presa aguas arriba extraída de (Pelegrín Garrido, 2009). Se desconoce la fecha exacta de la toma. B) Antigua fotografía aérea del pantano de Valdeinfierno desde aguas abajo de la presa, parte de la colección "postales antiguas de España", exposiciones Tesoros del Ayer. Se desconoce la fecha exacta de la toma. C) Fotografía tomada en diciembre de 1995 extraída de (Poesen et al., 2002). D) Fotografía tomada en febrero de 2011 extraída de (Romero-Díaz et al., 2011). E) Fotografía extraída del fondo de fotografía histórica (Lorca, 2010). Se desconoce la fecha exacta de la toma. F) Fotografía de la presa de Valdeinfierno de los años 40 extraída de (Pascual Vera, 2005). G) Fotografía tomada por el autor de la tesis en Abril de 2010.....	45
Figura 3.1: Caracterización geológica del área de la cuenca hidrográfica del río Guadalentín, caracterizada como cuenca de drenaje intra-orogénica (modificado de(Silva et al., 1996).....	51
Figura 3.2: Distribución actual de los distintos sedimentos Pliocenos y Cuaternarios en la cuenca de Valdeinfierno. Las dos zonas marcadas comprenden las áreas de María(1; ubicada más al SW) y cortijo de Guadalupe(2; ubicada más al NE) en las que se han levantado columnas y paneles estratigráficos. En la leyenda, los niveles aluviales T se corresponden a terrazas y los G-T aniveles de glacia-terrazas, numerados correlativamente de más recientes a más antiguos.	53
Figura 3.3: Distribución de los asentamientos humanos en la cuenca de Valdeinfierno, caracterizados por el periodo más antiguo del que se tiene constancia de su ocupación. La distribución y edad de los emplazamientos se ha extraído de (Martínez García, 1994), (Martínez López y Muñoz Muñoz, 1999) y (Ocharan Ibarra, 2010).....	56
Figura 3.4: Mapa geomorfológico del sector de María (1) en el que se indican los puntos en los que se han levantado las distintas columnas estratigráficas de éste sector (el perfil Vado María Fuensanta corresponde al sector de cortijo de Guadalupe (2)). En la leyenda, los niveles aluviales T se corresponden a terrazas y los G-T aniveles de glacia-terrazas, numerados correlativamente de más recientes a más antiguos.....	61
Figura 3.5: Interpretación sobre imagen del afloramiento del Cortijo de Diego, en la que se indican las distintas unidades identificadas en la estratigrafía.	62
Figura 3.6: Interpretación de los tres niveles aterrazados identificados en la zona Cortijo de Juntas de Abajo, incluyendo algunos de los niveles identificados en las distintas unidades del afloramiento, así como las edades determinadas mediante las distintas dataciones (dadas en años calibrados B.P.).	65
Figura 3.7: Panel estratigráfico con las columnas estratigráficas detalladas y esquema de los tres niveles aterrazados e insertados, identificados en la zona Cortijo de Juntas de Abajo(dadas en años calibrados B.P.).	66
Figura 3.8: Mapa geomorfológico del sector de cortijo de Guadalupe (2) en el que se indican los puntos en los que se han levantado las distintas columnas estratigráficas de éste sector. En la leyenda, los niveles aluviales T se corresponden a terrazas y los G-T aniveles de glacia-terrazas, numerados correlativamente de más recientes a más antiguos.....	69

Figura 3.9: Panel estratigráfico en el que se conectan las columnas de los distintos afloramientos de la parte alta de la rambla Mayor. El panel incluye los distintos estratos comunes presentes en las secuencias descritas, así como los niveles que han sido datados mediante radiocarbono (Edad en años calibrados B.P.).....	70
Figura 3.10: Interpretación sobre imagen del afloramiento del Cortijo de Guadalupe, en la que se indican las edades determinadas mediante las distintas dataciones y algunos de los niveles descritos en las distintas secuencias. A: detalle de niveles deformados. B: detalle de nivel de antidunas (Edad en años calibrados B.P.).	72
Figura 3.11: Afloramiento de Cerrejil, en la que se indican las edades determinadas mediante las distintas dataciones y algunos de los niveles más característicos descritos en las distintas secuencias. A: zona de detalle del afloramiento B: Detalle de niveles ricos en <i>Charcoal</i> (posible incendio) C: Detalle de niveles deformados (Paleosmita). Edades en años calibrados B.P.	74
Figura 3.12: Interpretación sobre imagen del afloramiento del barranco del oso en el que se indican algunos de los estratos más característicos de las distintas secuencias, así como los niveles de los que se ha determinado su edad. La escala graduada en la imagen tiene una longitud de 2m. Edades en años calibrados B.P.	76
Figura 3.13: Interpretación sobre imagen del afloramiento del barranco del oso en el que se indican algunos de los estratos más característicos de las distintas secuencias, así como los niveles de los que se ha determinado su edad. Edades en años calibrados B.P.	77
Figura 3.14: Columna estratigráfica del afloramiento del estrecho donde se indica la edad de los estratos en los que se han adquirido muestras de <i>charcoal</i> . Edades en años calibrados B.P.	79
Figura 3.15: Columna estratigráfica e imagen del afloramiento del Vado María Fuensanta donde se indica la edad de los estratos en los que se han adquirido muestras de <i>charcoal</i> . Edades en años calibrados B.P.	80
Figura 3.16: Periodos de producción/ erosión de sedimentos en la cuenca de Valdeinfierno, en base a las tendencias sedimentarias y erosivas descritas en la cuenca y las edades determinadas en los afloramientos, comparado con la curva de probabilidad relativa del programa OXCAL. Arriba; Abajo : Distribución temporal de los principales periodos de agradación, edafización e incisión, con indicación de las tasas de la actividad . Los periodos de agradación del río Guadalentín en Puentes y en la Rambla Torrealvilla corresponde a Baartman et al. (2011), y las correspondientes al abanico de Lorca, a Silva et al. (2008).....	82
Figura 4.1: Figura modificada de Romero-Díaz et al. (2011), en la que se define la tasa de erosión media medida en distintos puntos de la región de Murcia, mediante distintas técnicas de análisis de la erosión.	93
Figura 4.2: Modelo digital del terreno (A) y mapas calculados a partir de éste, necesarios para el modelo hidrológico: (B) Mapa de pendientes, (C) mapa de celdas acumuladas, (D) mapa de velocidades en ladera, (E) mapa de direcciones del flujo.	96
Figura 4.3: Mapas de usos del suelo simplificados en seis categorías. Corresponden los mapas de usos y aprovechamientos del suelo de la Junta de Andalucía de 1956, del Ministerio de Agricultura de 1976, y del proyecto CORINE-Land cover de 1990, 2000 y 2006.....	97
Figura 4.4: Valores de los factores de vegetación para cada uno de los tipos de uso del suelo considerados para el modelo.98	
Figura 4.5: Parámetros hidrológicos de la cuenca suministrados al modelo TETIS: (H*) Valores de humedad óptima del suelo; (Hu) Valores de almacenamiento capilar del suelo (o almacenamiento estático máximo); (Ks) Valores de capacidad de infiltración del suelo (o conductividad hidráulica saturada del suelo); (Kp) Valores de la capacidad de percolación del suelo (o conductividad hidráulica saturada del sustrato); (Kps) Valores de las pérdidas al acuífero. .	101
Figura 4.6: Mapa de la distribución del parámetro <i>P</i> de la USLE en la cuenca con valor de $P=0.75$ en los cultivos con arado perpendicular a dirección de máxima pendiente de la ladera y $P=1$ en el resto, utilizando las zonas determinadas mediante las imágenes del PNOA, según los valores propuestos por Wischmeier and Smith, (1978) y siguiendo las recomendaciones de Almorox et al.(1994).	106
Figura 4.7: Mapa de la distribución del parámetro <i>C</i> de la USLE en la cuenca para los usos del suelo del mapa CORINE de 2006, con valores comprendidos entre $C=0$ y $C=0.44$ siguiendo el ejemplo de deVente et al. (2008) y considerando el valor de $C=0.8$ en las zonas de <i>badlands</i> (Almorox et al., 1994; Alatorre et al., 2010), localizadas en las imágenes del PNOA actuales, que determinan los distintos usos del suelo de la cuenca.....	107
Figura 4.8: Mapa de la distribución del parámetro <i>K</i> de la USLE en los suelos de la cuenca de estudio con valores comprendidos entre $K=0.015$ y $K=0.63$ y que indica su erosionabilidad.....	109
Figura 4.9: Mapa de la distribución de las texturas granulométricas en la cuenca, para cada uno de los suelos, expresadas en porcentaje. (Ar) arena, (Ac) arcilla y (L) limo.	110
Figura 4.10: Mapa de la cuenca en el que se indica la localización de todos los diques de retención de sedimento en la cuenca de estudio. Los puntos blancos corresponden a la ubicación de los diques que no han podido ser utilizados ya	

- que se encuentran destruidos o colmatados, mientras que los puntos rojos indican los diques seleccionados, con su identificador..... 111
- Figura 4.11: Modelos digitales de elevación del dique Z1 desarrollados a partir de las nubes de puntos tomadas por el láser escáner terrestre. (A) MDT de los puntos tomados por el láser sin filtrar con una resolución de píxel de 2 cm. (B) MDT de los puntos filtrados generalizando la cota mínima por píxel de resolución 10 cm. (C) MDT con borrado manual de los puntos de más de 10 cm de diferencia con los puntos más bajos colindantes e interpolando linealmente el valor en el punto. La resolución de este MDT es de 10 cm..... 114
- Figura 4.12: Mapas de las diferencias en los depósitos de sedimento antes y después de la avenida de Septiembre de 2012. El color amarillo indica zonas que no han variado entre las distintas tomas de datos, el color verde identifica acumulación de sedimento entre la primera y segunda medida y el color rojo indica erosión. Se observa la diferencia de precisión entre el dique Z10 y los demás diques ya que es el único dique en el que las dos tomas de datos se han adquirido con GPS..... 119
- Figura 4.13: Curvas altura-volumen elaboradas para cada uno de los diques de retención de sedimento. El eje vertical corresponde al volumen de la cubeta, mientras que el eje horizontal corresponde a la altura de sedimento en el dique. Los puntos corresponden a los volúmenes calculados siguiendo la metodología de (Bussi et al., 2013). Las curvas corresponden a la ecuación potencial definida en cada uno de los diques..... 121
- Figura 4.14: Hidrograma del caudal de simulación calculado en la cuenca de Valdeinfierno frente al caudal observado (eje inferior) y el hietograma de precipitación en la cuenca (eje superior), para el periodo de calibración hidrológica (periodo 2 de 1976 a 1984)..... 129
- Figura 4.15: Hidrograma del caudal de simulación calculado en la cuenca de Valdeinfierno frente al caudal observado (eje inferior) y el hietograma de precipitación en la cuenca (eje superior), utilizando los parámetros de calibración hidrológica del periodo 2, (de 1976 a 1984), para el periodo de validación (periodo 7 del 9 de 2011 al 12 de 2012)..... 129
- Figura 4.16: Caudal de sedimento simulado en la cuenca de Valdeinfierno (eje superior), frente caudal de agua simulado (eje inferior), para el periodo de calibración sedimentológica (periodo 7, del 9 de 2011 al 12 de 2012). 132
- Figura 4.17: Caudal de sedimento calculado en la cuenca de Valdeinfierno (eje superior), frente caudal de agua simulado (eje inferior), utilizando los parámetros de calibración sedimentológica del periodo 7, (del 9 de 2011 al 12 de 2012), para el periodo de validación (periodo 2 de 1976 a 1984)..... 133
- Figura 4.18: Hidrogramas del caudal de simulación calculado en la cuenca de Valdeinfierno mediante el modelo TETIS en los distintos periodos considerados (1971-76(1), 1976-84(2), 1984-95(3), 1995-01(4), 2001-09 (5), 2009-12(6)), frente al caudal observado (eje inferior) y el hietograma de precipitación en la cuenca (eje superior). 135
- Figura 4.19: Caudales de sedimento simulados en la cuenca de Valdeinfierno utilizando el modulo TETIS-SED (eje superior), frente al caudal simulado mediante el modelo TETIS (eje inferior), para cada uno de los periodos considerados (1971-76(1), 1976-84(2), 1984-95(3), 1995-01(4), 2001-09 (5), 2009-12(6)). 136
- Figura 4.20: Volumen acumulado mediante los caudales de flujo observado y simulado utilizando el modelo TETIS, durante todo el periodo instrumental en la cuenca de Valdeinfierno. La alternancia en la coloración de fondo, indica cada uno de los periodos de simulación considerados (1971-76(1), 1976-84(2), 1984-95(3), 1995-01(4), 2001-09 (5), 2009-12(6))..... 137
- Figura 4.21: Volumen acumulado mediante el caudal simulado de flujo líquido y de sedimentos, utilizando el modulo TETIS-SED durante todo el periodo instrumental en la cuenca de Valdeinfierno. Debido a la diferencia de escalas entre los volúmenes, los resultados de caudal líquido se presentan en el eje principal (izquierdo) y los resultados del caudal de sedimentos se presentan en el eje secundario (derecho). La alternancia en la coloración de fondo, indica cada uno de los periodos de simulación considerados (1971-76(1), 1976-84(2), 1984-95(3), 1995-01(4), 2001-09 (5), 2009-12(6)). 137
- Figura 4.22: Zonas de protección natural por categoría del parque de Sierra María -Los Vélez. (I): Ubicación del parque respecto a la cuenca de estudio. (II): Mapa adaptado de Agencia-de-Medio-Ambiente (1994), en el que se indican las distintas categorías de protección del parque natural en 1994: A1, Ecosistemas excepcionales maduros. A2, Ecosistemas excepcionales en evolución. B1, Formaciones Boscosas. B2, Áreas de restauración Hidrológico-Forestal. C1, Áreas de cultivos tradicionales. C2, áreas de protección común (áreas naturales sin protección específica). (III): Mapa adaptado de (Agencia-de-Medio-Ambiente, 2005) en el que se indican las categorías consideradas en 2005: A, Áreas de Reserva con valor ecológico y paisajístico. B, Zonas de regulación especial, susceptibles a un aprovechamiento sostenible. C, Zonas de regulación común, para aprovechamiento agrícola y explotación de canteras..... 148

Figura 4.23 Porcentaje de cada uno de los tipos de usos del suelo considerados por el modelo TETIS y TETIS-SED, correspondientes a los mapas de usos y aprovechamientos del suelo de la Junta de Andalucía de 1956(1), del Ministerio de Agricultura de 1976(2), y del proyecto "CORINE <i>land cover</i> " de 1990(3), 2000(4) y 2006(5).	150
Figura 4.24 Evolución demográfica de las poblaciones de María y Vélez-Blanco, desde 1981 hasta 2012 en la que se resaltan las distintas fechas en las que se han producido modificaciones en la política agraria común (PAC) referentes a las ayudas a la agricultura de los países miembros, fechas de modificación del PORN y fechas de toma de los datos de usos del suelo.	152
Figura 4.25 Volumen de escorrentía acumulado en el embalse y pico máximo de caudal de agua, en cada uno de los periodos de simulación considerados, para cada uno de los escenarios de usos del suelo.	154
Figura 4.26 Volumen de sedimento transportado y pico de caudal de sedimento transportado en cada uno de los periodos de simulación considerados, para cada uno de los escenarios de usos del suelo.	155
Figura 4.27 Volumen de agua y sedimento acumulado en el embalse de Valdeinfierno para cada uno de los distintos escenarios de usos del suelo, a lo largo de todo el periodo instrumental.	157
Figura 5.1: Comparación entre la precipitación acumulada observada y simulada mediante <i>downscaling</i> de los datos atmosféricos del ECMWF. Se han elaborado distintos gráficos considerando diversos umbrales mínimos de precipitación (filtros).....	175
Figura 5.2: Caudal acumulado de agua y de sedimento calculados mediante el modelo TETIS-SED, considerando los datos meteorológicos de observación (en azul) y los datos meteorológicos sintéticos calculados mediante el modelo GLIMCLIM a partir de las variables sinópticas de reanálisis del ECMWF, para el periodo del que se dispone de datos de reanálisis (1979-2012).	179
Figura 5.3: Representación esquemática de las familias de escenarios SRES. Las familias A1 y A2 se centran más en factores económicos que las familias B1 y B2, que se centran más en factores medioambientales. Las familias A1 y B1 se basan en un mundo con una economía y desarrollo de carácter global (mayor eficiencia energética, disminución de la población desde mitad del S.XXI), mientras que en las líneas evolutivas de las familias A2 y B2 consideran que la economía presentará un carácter regional (mayor autosuficiencia, tecnología fragmentada). Figura modificada de (Canadian_climate_Impacts_scenarios, 2003).....	181
Figura 5.4: Previsión de las emisiones de gases de efecto invernadero presentados en el AR4, calculados en base a los grupos de escenarios seleccionados del SRES (líneas coloreadas) y el rango de percentil 80 de los escenarios posteriores al SRES (post-SRES, en sombreado gris). La línea de puntos indica el rango total de escenarios post-SRES (figura extraída de Bernstein et al., 2007).....	183
Figura 5.5: Diagrama de flujo del procedimiento para determinar las series meteorológicas sintéticas para el periodo 1961-1990 a partir de las series instrumentales de todas las estaciones de medida instrumental y las series sintéticas calculadas utilizando GLIMCLIM.....	185
Figura 5.6: Volumen acumulado de la simulación hidrológica en el embalse de Valdeinfierno, a lo largo del siglo XXI, calculado mediante el modelo TETIS, para cada uno de los GCMs en los escenarios B1, A1B, y A2. En los gráficos se resalta las curvas correspondientes al volumen acumulado de la aplicación directa de la meteorología de referencia (base), el modelo que genera el mayor volumen transportado (GIER en B1 y en A2 y CGMR en A1B), el que genera el menor volumen transportado (BCCM1 en B1, GIAOM en A1B y MRCGCM en A2), y la media de todos los modelos.	187
Figura 5.7: Volumen de sedimento acumulado en el embalse de Valdeinfierno, a lo largo del siglo XXI, calculado mediante el módulo TETIS-SED, para cada uno de los GCM considerados en el AR4 y en tres escenarios SRES (B1, A1B y A2). En los gráficos se resaltan las siguientes curvas: Azul: resultado de aplicar la meteorología de referencia (base); Roja: el modelo que genera el mayor volumen transportado (GIER en B1 y en A2 y CGMR en A1B); Verde: modelo que genera el menor volumen transportado (BCCM1 en B1, GIAOM en A1B y MRCGCM en A2); Negro: la media de todos los modelos.	190
Figura 5.8: Periodo de retorno de la precipitación máxima anual calculado utilizando la función de distribución SQRT-ET Max (Etoh et al., 1987) en base a los datos de precipitación diaria de la AEMET para el periodo 1971-2012... ..	194
Figura 5.9: Volumen acumulado de la simulación hidrológica en el embalse de Valdeinfierno, a lo largo del siglo XXI, calculados mediante el modelo TETIS, para cada uno de los GCM de los escenarios SRES considerados en el AR4, considerando un pico equivalente al máximo del registro instrumental en distintos momentos del siglo XXI (un único evento en cada modelización). En los gráficos se indica en rojo, el modelo que genera el mayor volumen transportado, en verde el que genera el menor volumen transportado y en negro la media de todos los modelos.....	196

Figura 5.10: Volumen de sedimento acumulado en el embalse de Valdeinfierno, a lo largo del siglo XXI, calculados mediante el módulo TETIS-SED, para cada uno de los GCM considerados en el AR4 y tres escenarios SRES (B1, A1B y A2), considerando un pico equivalente al máximo del registro instrumental en distintos momentos del siglo XXI (un único evento en cada modelización). En los gráficos se indica en rojo, el modelo que genera el mayor volumen transportado, en verde el que genera el menor volumen transportado y en negro la media de todos los modelos.	197
Figura 5.11: Valores de los factores de vegetación estacionales (adimensionales) introducidos como dato en el modelo TETIS, en los que a las categorías de usos del suelo previamente definidas, se les ha añadido las dos nuevas coberturas "Terreno agrícola con Barbecho verde" y "Suelo desnudo".....	202
Figura 5.12: Mapas de distribución de los usos del suelo considerando la configuración de usos U1, en el que se considera un aumento del 5% del uso del suelo para finalidades agrícolas, en cada intervalo de 30 años.....	205
Figura 5.13: Mapas de distribución de los usos del suelo considerando la configuración de usos U2, representados en intervalos de 30 años, en los que se considera que se mantiene la extensión de usos agrícolas actuales, pero se aplican las buenas prácticas de cultivo propuestas por la PAC (European-Comision, 2013b), y se introduce vegetación permanente en las zonas de cultivos (barbecho verde).	207
Figura 5.14: Mapas de distribución de los usos del suelo considerando la configuración de usos U3, representados en intervalos de 30 años, en los que se considera que la extensión de usos agrícolas actuales se reduce un 10% en cada intervalo. Las zonas de abandono reciente, se han considerado que pertenecen a una nueva categoría de suelo desnudo.	209
Figura 5.15: Mapas de distribución de los usos del suelo considerando la configuración de usos U4, representados en intervalos de 30 años, en los que se considera que la extensión de usos agrícolas actuales se reduce un 20% en cada intervalo.....	210
Figura 5.16: Mapas de distribución de los usos del suelo considerando la configuración de usos U5, representados en intervalos de 30 años, en los que se considera que la extensión de usos agrícolas actuales se reduce un 30% en cada intervalo.....	212
Figura 5.17: Comparativa entre los últimos usos del suelo mapeados en el periodo instrumental (U-2006; CORINE Land Cover 2006,(EEA, 1995) y los porcentajes de cada tipo de suelo utilizado en cada uno de las distintas configuraciones de usos (U1, U2, etc.) separados en bloques de treinta años, siguiendo los tres intervalos de simulación.	212
Figura 5.18: Previsión del volumen de agua y de producción de sedimentos en la cuenca del embalse de Valdeinfierno a lo largo del siglo XXI, considerando las distintas configuraciones de usos del suelo desarrolladas aplicadas sobre los GCM seleccionados como los de máxima mínima y media erosión en cada uno de los escenarios SRES considerados en el AR4.....	215
Figura 5.19: Aportación media anual de la escorrentía (izquierda) y erosión media anual (derecha), combinando todos los modelos de circulación climática para los escenarios de emisión de los SRES del AR4, y las cinco configuraciones de uso del suelo. En la parte superior se indica la proporción relativa de terreno ocupado por la agricultura en la cuenca, según la configuración de los usos del suelo. En tonos rojos y naranjas se resaltan las aportaciones anuales más altas, en tonalidades verdes las aportaciones más bajas, y en tonalidades amarillas las aportaciones intermedias.	216
Figura 6.1, parte de los mapas. (A) "Mapa de parte de la jurisdicción de los reinos de Granada y Murcia (Próspero de Verbom, 1721) y (B) "Mapa geográfico del reino de Granada", (D. Tomás López, 1795), elaborados para el Servicio Geográfico del Ejército. extraídos de Gómez Cruz (1991).....	227
Figura 6.2 Reconstrucción de la distribución de los usos del suelo en la cuenca de Valdeinfierno alrededor del año 1900 (finales del siglo XIX y principios del XX), elaborada a partir de los mapas topográficos de la serie 1:50000 modificando el mapa de usos de 1956 (Junta de Andalucía, 2003).....	228
Figura 6.3 porcentaje de cada uno de los tipos de usos del suelo en la cuenca de Valdeinfierno alrededor del año 1900, calculado a partir del mapa de distribución determinado mediante los mapas topográficos de la serie 1:50000 más antiguos disponibles.	229
Figura 6.4 Comparación de la precipitación anual acumulada en la estación de Murcia frente a la media de los resultados del reanálisis 20CR (arriba), y la media de las series en las estaciones de Valdeinfierno del periodo de referencia añadiéndole las anomalías calculadas sobre el 20CR (60-90+20CR, abajo), a lo largo del periodo 1871-1959.	231
Figura 6.5 Comparación de la precipitación acumulada mensual media en la estación meteorológica de Murcia frente a la media de los resultados del reanálisis 20CR, y la media de las series en las estaciones de Valdeinfierno del periodo de referencia añadiéndole las anomalías calculadas sobre el 20CR (60-90+20CR),para todo el periodo 1871-1959.....	232
Figura 6.6 Comparación de la precipitación acumulada anual entre la estación meteorológica de Murcia frente a la media de las estaciones de Valdeinfierno del periodo 1942-2009.....	234

Figura 6.7 Comparación de la precipitación acumulada anual entre la estación meteorológica de Murcia frente a la Precipitación determinada por Pauling et al. (2006) a lo largo del periodo 1871-1959.	234
Figura 6.8 Comparación de la precipitación acumulada anual entre la estación meteorológica de Murcia frente a la media de la precipitación reconstruida en las estaciones de Valdeinfierno utilizando la serie de Murcia (VRM), a lo largo del periodo 1871-1959.	235
Figura 6.9 Comparación de la precipitación mensual entre la estación meteorológica de Murcia frente a la media de la precipitación de las estaciones de Valdeinfierno, y la media de la precipitación reconstruida en las estaciones de Valdeinfierno utilizando la serie de Murcia (VRM).....	236
Figura 6.10 Volumen mensual en los embalses de Puentes y Valdeinfierno entre 1942 y 2000, en los que la serie de Valdeinfierno se ha reconstruido respecto a la serie de puentes, desde 1942 a 1970.	238
Figura 6.11 Comparación de la temperatura media anual entre la estación meteorológica de Murcia frente a serie resultante de la media de las estaciones de Valdeinfierno y de los resultados del 20CR a lo largo del periodo 1942-2000.	240
Figura 6.12 Comparación de la temperatura mensual media entre la estación meteorológica de Murcia, la serie resultante de la media de las estaciones de Valdeinfierno, y la media resultante de los <i>ensembles</i> del 20CR, para todo el periodo 1942-2000.....	241
Figura 6.13 Hidrología desde 1871 a 1959, simula por el modelo TETIS-SED considerando los usos del suelo de 1900 en toda la serie (línea continua) los usos de 1956 en el periodo 1931-1959 (línea discontinua), utilizando las series de precipitación VRM (arriba) y la media, el máximo y el mínimo (de los 56 valores por fecha) del reanálisis 20CR (abajo).	243
Figura 6.14 Producción de sedimentos desde 1871 a 1959, simula por el modelo TETIS-SED considerando los usos del suelo de 1900 en toda la serie (línea continua) los usos de 1956 en el periodo 1931-1959 (línea discontinua), utilizando las series de precipitación VRM (arriba) y la media, el máximo y el mínimo (de los 56 valores por fecha) del reanálisis 20CR (abajo).....	244
Figura 6.15 Comparación de los caudales máximos anuales simulados con el modelo TETIS-SED en base a las series de precipitación VRM (arriba) y VHRM (abajo), considerando los usos del suelo de 1900 para el intervalo 1961-1970.....	245
Figura 6.16 Comparación del volumen mensual de agua acumulado en Valdeinfierno, resultante de la simulación del TETIS utilizando las series VRM (arriba) y VHRM (abajo), frente a la serie mensual reconstruida respecto a la serie de puentes (VRP), desde 1942 a 1970.....	246
Figura 6.17 Comparación del volumen hídrico (arriba) y de sedimentos (abajo) acumulados en Valdeinfierno en el periodo 1863- 1970, simulados por el TETIS-SED, considerando los usos del suelo de 1900 (línea continua) y los usos del suelo de 1956 (línea discontinua) en el intervalo 1961-1970, considerando las series VRM (gris) y VHRM (negro).....	247
Figura 7.1 Hidrograma y caudal de sedimento diario calculados y estimados en la presa de Valdeinfierno entre 1863 y 2009, considerando los usos y los escenarios climáticos cuyos caudales son máximos (columnas en negro) y mínimos (columnas en gris).	258
Figura 7.2 Volumen de transporte de agua y sedimentos en la presa de Valdeinfierno entre 1863 y 2009, considerando el rango (sombreado gris oscuro) y la media (línea discontinua) del resultado de las distintas simulaciones en función de las configuraciones de usos del suelo y los escenarios climáticos.....	259
Figura 7.3 Volumen de aporte de agua y erosión media anual de cada década del periodo comprendido entre 1863 y 2009, considerando los valores de erosión y transporte máximos(línea negra), mínimos(línea gris) y medios(línea discontinua).el volumen de agua y la erosión anual media para todo el periodo considerado esta referenciado por la línea punteada.....	261

Índice de tablas

Tabla 2.1: Suelos dominantes que pueden incluir suelos minoritarios (inclusiones) en los que se ha tomado muestra y se ha descrito su estructura y ambiente (pendiente, orientación y aspecto).....	39
Tabla 3.1: Dataciones de radiocarbono de los depósitos del sector de María, y edades calibradas con la curva IntCal_13 para el Hemisferio Norte (Reimer et al., 2013) calibradas calculadas utilizando el programa OXCAL versión 4.2 (Bronk Ramsey,2009). En el código de Laboratorio (Cod. Lab.) se indica el laboratorio donde se ha datado la muestra (Poz: <i>Poznan Radiocarbon Laboratory</i>).	59
Tabla 3.2: Dataciones de radiocarbono de los depósitos del sector de Cortijo de Guadalupe, y edades calibradas con la curva IntCal_13 para el Hemisferio Norte (Reimer et al., 2013) calibradas calculadas utilizando el programa OXCAL versión 4.2 (Bronk Ramsey,2009). En el código de Laboratorio (Cod. Lab.) se indica el laboratorio donde se ha datado la muestra (CNA: Centro Nacional de Aceleradores de Sevilla; Poz: <i>Poznan Radiocarbon Laboratory</i> ; UZ: <i>Radiocarbon laboratory of the Department of Geography at the University of Zurich</i> ;GIUZ).	59
Tabla 4.1: Valores de los la interceptación máxima en función del uso del suelo en la cuenca de Valdeinfierno.....	98
Tabla 4.2: Características de los suelos de la cuenca de Valdeinfierno, resultantes de 59 muestras tomadas en campo, para esta Tesis Doctoral, en los distintos tipos de suelo diferenciados en la leyenda de los mapas del proyecto LUCDEME del Ministerio de Agricultura.....	99
Tabla 4.3: conductividad hidráulica del sustrato, determinada mediante la reclasificación del mapa geológico (Puricelli, 2003).....	102
Tabla 4.4: Coeficientes (κ , c_1 , c_d , c_n) y exponentes (φ , ε_1 , ε_2 , θ , ξ) geomorfológicos de la cuenca de Valdeinfierno calculados a partir de los resultados de Conesa García y Álvarez Rogel (1996) en una cuenca de características similares.....	103
Tabla 4.5: Valores adoptados para el factor C de la USLE en base a los distintos usos del suelo, considerados mediante la modificación de los datos del proyecto CORINE-Land cover nivel 3 (de Vente et al., 2008), en la cuenca de Valdeinfierno, y la presencia de suelos degradados.	107
Tabla 4.6: Características geométricas y espaciales de los diques de retención se sedimentos considerados en la cuenca de la presa de Valdeinfierno. Los pares de diques Z6, Z6b y Z9, Z8 se encuentran en el mismo barranco dos a dos, el primero en cada par es el dique de aguas arriba.	112
Tabla 4.7: Número de puntos y errores derivados de la obtención y procesado de las medidas, en los diques de retención de sedimento. Los diques con asterisco son aquellos que se han medido mediante GPS diferencial, mientras que los demás se han medido mediante TLS. Puesto que la cobertura vegetal no afecta a las medidas de GPS, el error derivado de la vegetación en los diques medidos con esta técnica es 0.....	115
Tabla 4.8: Valores de los parámetros texturales y físico-químicos medidos en cada uno de los depósitos de sedimento de los distintos diques de retención. La densidad, las fracciones granulométricas, el contenido de materia orgánica y la conductividad eléctrica son el resultado de análisis de laboratorio, mientras que el número de eventos se basa en observaciones de campo. El espesor de los de depósitos se ha calculado como la suma de los espesores medios de cada uno de los eventos calculados como el cociente entre el área expuesta y la longitud del estrato en las zanjas.	116
Tabla 4.9: Número de eventos por dique y volumen de sedimento de cada uno de ellos calculado mediante la superficie de los depósitos y los espesores determinados en las zanjas.	117
Tabla 4.10: Volumen calculado entre la dos superficies de alta resolución medidas en los diques de retención de sedimento (antes y después del evento de 2012).	118
Tabla 4.11: Características del depósito y aportación de sedimentos en cada dique, determinadas utilizando las ecuaciones de Brown (1943) y las curvas de Brune (1953) mediante las curvas de embalse.	120
Tabla 4.12: Tasas de erosión calculadas mediante los datos de volumen de sedimento en las zanjas y la comparación entre superficies antes y después del último evento. La columna de máximo registro contempla el evento de máximo espesor en las zanjas sin considerar el último evento (septiembre de 2012). La tasa de erosión 1 corresponde a los datos de erosión anual antes último evento, mientras que la tasa de erosión 2 corresponde a los datos anuales después del evento. La columna "estado actual" indica los diques que han sufrido colmatación o pérdidas durante el último evento.	122
Tabla 4.13: Datos relevantes para el estudio extraídos de los distintos informes del CEDEX correspondientes al embalse de Valdeinfierno, a los que se ha incluido el cálculo de la eficiencia de retención de la presa en base a la ecuación de	

Brown (1943) mediante las curvas de Brune (1953). La sedimentación y el aporte medio de la cuenca, así como las eficiencias de retención han sido calculados respecto al estudio anterior. Por lo tanto, el único estudio que considera la puesta en servicio del dique para los cálculos es el de 1976. El cálculo del aporte se ha considerado igual a 1 puesto que en el estudio de 1976 no se calcula la densidad de los sedimentos retenidos en el embalse.	123
Tabla 4.14: Intervalos temporales utilizados para las distintas simulaciones del módulo TETIS-SED. Estos intervalos se adaptan o bien a los años de construcción de alguno de los diques de retención de sedimento o bien a una medición batimétrica del embalse de Valdeinfierno. Nótese que el intervalo 7 se solapa con el intervalo 6, ya que el intervalo 7 contempla el periodo transcurrido entre las dos mediciones de detalle de la superficie de los depósitos de los diques.	124
Tabla 4.15: Valores de los límites aceptables del índice de Nash Sutcliffe de múltiples simulaciones hidrológicas utilizando distintos modelos, disponibles en la literatura.	127
Tabla 4.16: Valores de caudal (Q) volumen de agua acumulado en el en el embalse (V) y precipitación (P) en la cuenca de Valdeinfierno en los distintos periodos de simulación.	127
Tabla 4.17: Parámetros de corrección hidrológica considerados en la calibración automática SCE-UA (Duan et al., 1992), modificado por (Sorooshian et al., 1993) e incorporada al modelo TETIS (Frances et al., 2007), para su calibración respecto a un periodo de simulación.	128
Tabla 4.18: Valores de los límites aceptables del índice de desviación Pbias de distintas simulaciones hidrológicas utilizando distintos modelos, disponibles en la literatura.	130
Tabla 4.19: Valores de los límites de rendimiento del índice de desviación Pbias para el caudal y transporte de sedimentos.	131
Tabla 4.20: Parámetros de corrección sedimentológica calibrados en el modelo TETIS para su calibración respecto al periodo de simulación 7 que corresponde al intervalo entre Septiembre de 2011 y Diciembre de 2012.	132
Tabla 4.21: Volúmenes observados y simulados en los diques de retención de sedimentos para la calibración en el periodo de simulación 7 que corresponde al intervalo entre Septiembre de 2011 y Diciembre de 2012.	132
Tabla 4.22: Valores de caudal (Q), volumen de agua acumulado en el en el embalse (V) y valor del índice de Nash Sutcliffe (NS), observados y simulados en la cuenca de Valdeinfierno en los distintos periodos de simulación, utilizando la calibración del periodo 2.	138
Tabla 4.23: Valores de volumen de sedimento acumulado en el embalse de Valdeinfierno, procedentes de las batimetrías y simulado, valor del índice de Nash Sutcliffe (NS) y desviación Pbias en la cuenca de Valdeinfierno durante los distintos periodos de simulación en los que se dispone de datos batimétricos (periodo 2 y 3), utilizando la calibración del periodo 7.	138
Tabla 4.24: Relación entre los días en los que se produce escorrentía a nivel de cuenca y los días que se produce precipitación.	140
Tabla 4.25: Relación entre volumen de agua y volumen de transporte de sedimento simulados en la cuenca, y erosión anual derivada de los resultados de las simulaciones. La erosión media anual se refiere a la tasa de transporte de sedimento que llega al embalse dividida por la superficie total de la cuenca.	141
Tabla 4.26: Caudal máximo de salida de la cuenca, caudal máximo de sedimento movilizado y erosión máxima en 24 h producida en la cuenca de Valdeinfierno, en cada uno de los periodos de simulación considerados.	141
Tabla 4.27: comparación entre la erosión máxima y media en 24 h y influencia de la erosión máxima sobre la erosión total producida en la cuenca de Valdeinfierno, en cada uno de los periodos de simulación considerados.	142
Tabla 4.28: Diversos valores de erosión determinados en la bibliografía en zonas próximas o en la cuenca de estudio, organizados en función de la técnica de medida, y de mayor a menor valor de erosión.	143
Tabla 4.29: Porcentajes de terreno del parque natural de Sierra María-Los Vélez en función del grado de protección. Las superficies indicadas en 1994(2) corresponde al porcentaje de ocupación de 1994 adaptado a los grados de protección de 2005.	150
Tabla 4.30: Tabla resumen de las distintas políticas territoriales que afectan a la cuenca de Valdeinfierno.	151
Tabla 4.31: Comparación del volumen total y pico máximo, para caudal líquido y sedimentario a lo largo de todo el periodo instrumental, entre los distintos escenarios de usos del suelo.	156
Tabla 4.32: Determinación de la dependencia estadística según el coeficiente de correlación bilateral de Pearson y su significatividad, entre los resultados de las simulaciones hidrológica y sedimentológica, considerando los distintos usos del suelo a lo largo de todo el periodo instrumental.	158

Tabla 4.33: Determinación de la dependencia estadística según el coeficiente de correlación bilateral de Pearson y su significatividad, entre los distintos tipos de usos del suelo en la cuenca de Valdeinfierno y los resultados de las simulaciones hidrológica y sedimentológica.	159
Tabla 5.1: Determinación de las variables de reanálisis del ECMWF que influyen sobre las series instrumentales de precipitación (Prec.) y temperatura (Temp) según la calibración del programa GLIMCLIM considerando los dos estadios de aproximación, regresión logística (L) y distribución gamma (G), en las cinco celdas de datos consideradas. Las casillas sombreadas más oscuras indican que la serie no es significativa para el estadio. Las celdas sombreadas claras indican que pese a que la serie es significativa para uno de los estadios, no lo es para los dos. Se ha considerado una única columna de temperatura puesto que las variables que influyen en la temperatura máxima y la temperatura mínima coinciden.	170
Tabla 5.2: índice de Nash-Sutcliffe (NS), desviación Pbias (Pbias) y Correlación bivariada de Pearson (Pe, significativa en todos los casos en 0.01) entre las series instrumentales y las sintéticas, resultantes de cinco simulaciones distintas (s), para cada una de las estaciones meteorológicas (g) de la cuenca de Valdeinfierno, y para la precipitación media total. Las estaciones meteorológicas consideradas son: (g1) María1, (g2) Topares, (g3) Caravaca, (g4) Vélez-Blanco, (g5) Tirieza Alta (Lorca), (g6) Fontanares (Lorca), (g7) Valencianos (Vélez-Blanco), (g8) María2, (g9) Los Royos (Caravaca), (g10) Los Royos auto., (g11) Casa Alta (Caravaca), (g12) Valdeinfierno, (g13) Casa Iglesia. Las celdas sombreadas indican que la estación de medida no tiene datos suficientes para poder ser comparada con la serie sintética (>10% de medidas del periodo total considerado).	173
Tabla 5.3: índice de Nash-Sutcliffe (NS), desviación Pbias (Pbias) y Correlación bivariada de Pearson (Pe, significativa en todos los casos en 0.01) entre las series instrumentales y sintéticas, resultantes de cinco simulaciones distintas (s), para cada una de las estaciones meteorológicas (g) de la cuenca de Valdeinfierno, y para la precipitación media total, considerando la precipitación >0. Las estaciones meteorológicas consideradas son: (g1) María1, (g2) Topares, (g3) Caravaca, (g4) Vélez-Blanco, (g5) Tirieza Alta (Lorca), (g6) Fontanares (Lorca), (g7) Valencianos (Vélez-Blanco), (g8) María2, (g9) Los Royos (Caravaca), (g10) Los Royos auto., (g11) Casa Alta (Caravaca), (g12) Valdeinfierno, (g13) Casa Iglesia. Las celdas sombreadas indican que la estación de medida no tiene datos suficientes para poder ser comparada con la serie sintética (>10% de medidas del periodo total considerado).	173
Tabla 5.4: Comparación entre la media de las temperaturas mensuales máxima y mínima observadas y simuladas mediante <i>downscaling</i> de los datos atmosféricos del ECMWF.	176
Tabla 5.5: Correlación bivariada de Pearson entre serie de temperaturas diarias máxima y mínima observadas y simuladas mediante <i>downscaling</i> de los datos atmosféricos del ECMWF.	176
Tabla 5.6: Correlación de Pearson entre las series meteorológicas de precipitación y temperatura observadas y simuladas mediante <i>downscaling</i> , y los valores de circulación de Reanálisis del proyecto ERA-Interim del ECMWF. El sombreado indica que la correlación no es significativa.	178
Tabla 5.7: índice de Nash-Sutcliffe (NS), desviación Pbias y Correlación bivariada de Pearson (significativa en todos los casos en 0.01) entre los caudales de agua y sedimento calculados mediante las series meteorológicas instrumentales y sintéticas.	179
Tabla 5.8: Modelos de Circulación Global (GCM) utilizados por el IPCC para calcular las distintas previsiones de cambios de circulación a lo largo del siglo XXI, en base a los escenarios de cambio global (SRES) considerados en el AR4 (IPCC, 2007b).	184
Tabla 5.9: Valores de caudal máximo, volumen acumulado en el embalse y media de aporte hídrico anual al embalse de Valdeinfierno, durante el periodo 2011-2099, calculados mediante el modelo TETIS, para cada uno de los GCMs en tres escenarios SRES (B1, A1B, y A2) . Los valores máximos se marcan en negrita, los mínimos se marcan en sombreado gris claro y los modelos de circulación que no tienen datos para el escenario concreto, se marcan en sombreado gris oscuro.	188
Tabla 5.10: Producción de sedimento modelados mediante TETIS-SED para diferentes GCM y tres escenarios SRES considerados en el AR4. Se muestran los valores de producción de sedimento máximo diario, volumen total acumulado, tasa de producción anual (t/Ha) y la media anual (t) estimados en el embalse de Valdeinfierno, y para el periodo 2011-2099. En negrita se subrayan los valores máximos de cada uno de los parámetros hidrológicos. En sombreado gris claro se indican los valores mínimos de cada parámetro de la producción de sedimento. En sombreado gris oscuro se indica que los datos del modelo GCM no están disponibles y que no ha podido incorporar en el modelo hidrológico-sedimentario.	190
Tabla 5.11: Modelos de circulación climáticos seleccionados como representativos para los tres escenarios de cambio climático considerados.	193

Tabla 5.12: Principales avenidas ocurridas en la cuenca alta del Río Guadalentín obtenidas del registro histórico (Archivo Municipal de Lorca y Embalse de Puentes) y del registro de paleoavenidas reconstruido aguas arriba del Embalse de Valdeinfierno. Los caudales pico corresponden a los registrados en el Embalse de Puentes y a los reconstruidos con los datos de paleoavenidas (Tabla modificada de Benito et al.(2010)).	194
Tabla 5.13: Resultados de la simulación de la hidrología y sedimentología de caudal máximo, volumen acumulado en el embalse, media de aporte anual y erosión media anual, en diferentes horizontes temporales para los próximos 100 años, para cada uno de los GCM de los escenarios SRES considerados en el AR4. En estas simulaciones se ha considerando un pico equivalente al máximo del registro instrumental en distintos periodos del siglo XXI (un único evento en cada modelización). En negrita se marcan los valores máximos de cada parámetro y en sombreado gris claro se indican los valores mínimos.	196
Tabla 5.14: diferencias entre el valor máximo y mínimo de los valores hidrológicos característicos determinados entre todos los GCM incluidos en cada escenario de emisiones, considerando el evento de periodo de retorno de 100 años, y entre estos resultados y los de la simulación sin el pico de periodo de retorno de 100 años, para los valores característicos máximo y mínimo de la hidrología y la sedimentología.	198
Tabla 5.15: Previsión de la evolución poblacional de la comarca de los Vélez (que incluye Vélez-Blanco, Vélez-Rubio, María y Chirivel), desde el dato de 2009 hasta el 2035, estimada por el Instituto de estadística y cartografía de la junta de Andalucía (Junta_de_Andalucía, 2012), sobre el que se ha calculado el valor y porcentaje de decrecimiento.	208
Tabla 5.16: Valores de hidrología y sedimentología de caudal máximo, volumen acumulado en el embalse, media de aporte anual al embalse de Valdeinfierno y erosión media anual, en previsión de los próximos 100 años, para cada uno de las configuraciones de usos del suelo consideradas, aplicadas sobre los GCM seleccionados, determinados sobre los escenarios SRES del AR4. En negrita y sombreado gris, se subrayan los valores máximos y mínimos respectivamente, en cada escenario, de cada uno de los parámetros.	214
Tabla 6.1: Eventos añadidos o eliminados de las series de precipitación en Valdeinfierno reconstruidas sobre La serie de Murcia (VRM), en base a los registros documentales y naturales, los registros parciales de las estaciones en Valdeinfierno y los registros aforo en la presa de Puentes.	239
Tabla 6.2: Caudal máximo, volumen acumulado, media de aporte anual y erosión media anual en la cuenca de Valdeinfierno en función de las series VRM, VHRM y la media, el máximo y el mínimo de 20CR, en el periodo 1871- 1959, considerando en el intervalo 1931-1959 los usos del suelo de 1900 (arriba) y 1956 (abajo).	244
Tabla 6.3: Resultados de caudal máximo, volumen acumulado, media de aporte anual al embalse de Valdeinfierno y erosión media anual en la cuenca, en el intervalo 1863-1970, considerando en el intervalo 1961-1970 los usos del suelo de 1900 (arriba) y de 1956 (abajo), para la hidrología y el transporte de sedimentos de las series VRM y VHRM.	245
Tabla 7.1: Valores de evento extremo, volumen acumulado, media de aporte anual al embalse de Valdeinfierno y erosión media anual en la cuenca, en los intervalos 1863-1970, 1971-2012,2013-2099 y global (1863-2099).	260

Glosario de términos

Término	Definición
20CM3	Escenario de emisiones que considera el aumento de gases de efecto invernadero a lo largo del siglo XX, utilizado como referencia de distintos modelos de circulación de cambio climático en su periodo desde 1961 hasta 2000 (inclusive, del inglés: 20th Century Climate Experiment)
20CR	Modelo de reanálisis de reconstrucción del clima para el siglo XX (del inglés: 20th Century Reanalysis)
AD	Nomenclatura que se utiliza para dataciones, que indica que el número de años indicados es en años históricos (del latín, Anno Domini)
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
ANSWERS	Modelo de respuesta de cuenca a variaciones distribuidas no puntuales del entorno (del inglés: Areal Non-point Watershed Environmental Response Simulation model)
APEX	Modelo de gestión de usos del suelo, que contiene un módulo de simulación hidrológica, desarrollado por U.S. Department of agriculture (del inglés: Agricultural Policy Environmental extender)
AR4	4º informe de asesoramiento sobre el cambio climático del comité de expertos del IPCC (del inglés: Fourth Assessment Report)
AR5	5º informe de asesoramiento sobre el cambio climático del comité de expertos del IPCC (del inglés: Fifth Assessment Report)
BCC-CM1	Modelo de circulación global de la administración meteorológica China
BCM	Modelo de circulación global del centro de investigación climática de la universidad de Bergen, Noruega
BOJA	Boletín Oficial de la Junta de Andalucía
BP	Nomenclatura que se utiliza para dataciones, que indica que el número de años indicados es antes del "presente" considerado en 1950 (del inglés, Before Present)
CCSM3	Modelo de circulación global del NCAR Americano (del inglés: Community Climate System Model, version 3.0)
CCSR	Centro para la investigación del sistema climático, de la universidad de Tokio, Japón (del inglés: Center for Climate System Research)
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CEE	Comunidad económica europea
CGCM3	Modelo de circulación global del centro de modelización y análisis climático de Canadá
CHS	Confederación Hidrográfica del Segura
CM2.0 - AOGCM	Modelo de circulación global del laboratorio de geofísica de la dinámica de los fluidos del NOAA
CM2.1 - AOGCM	Modelo de circulación global del laboratorio de geofísica de la dinámica de los fluidos del NOAA

CMIP3	Fase 3 del proyecto de comparación de modelos climáticos acoplados, facilitado por el IPCC como base de datos para la obtención de modelos de circulación climática (del inglés: Coupled Model Intercomparison Project Phase 3)
CNRM-CM3	Modelo de circulación global del centro nacional de investigaciones meteorológicas de Francia
CORINE	Coordinación de Información Sobre el Medio Ambiente (del inglés: Coordination of Information of the Environment)
CREAMS	Modelo de escorrentía, química y erosión de los sistemas de gestión agrícola (del inglés: Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems)
CSIRO	Agencia de investigación Australiana (del inglés: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation)
CSMD	División de sistemas de modelización del clima, del centro nacional del clima, de la administración meteorológica China (del inglés: Climate System Modeling Division)
DGIGC	Dirección general del instituto geográfico y catastral, precursor del Instituto Geográfico Nacional
DGIGCE	Dirección general del instituto geográfico catastral y de estadística, precursor del Dirección general del instituto geográfico y catastral
DHM	Modelo de difusión hidrodinámica desarrollado por U.S. Geological survey, Water resources division (del inglés: Diffusion Hydrodynamic Model)
DOE	Departamento para la energía del gobierno de Estados Unidos (del inglés: Department Of Energy)
Downscaling	Conjunto de procesos cálculos y modelos que permiten determinar variables climáticas y meteorológicas locales a partir de variables de circulación globales y regionales
ECHAM4	Modelo de circulación global inter-agencia de origen alemán
ECHAM5/MPI-OM	Modelo de circulación global del Instituto de meteorología alemán Max Planck
ECHO-G	Modelo de circulación global inter-agencia de origen alemán
ECMWF	Centro Europeo Para la Predicción Meteorológica de Medio Rango (del inglés: European Center for Medium-Range Weather Forecasts)
EEA	Agencia medioambiental Europea (del inglés: European Environmental Agency)
EGEM	Modelo de erosión en cárcavas efímeras (del inglés: Ephemeral Gully Erosion Model)
ENSO	Fenómeno climático de oscilación de la temperatura oceánica del pacífico conocido popularmente como El Niño o La Niña (del inglés: El Niño Southern Oscillation)
EPIC	Calculo del impacto de la producción de sedimentos (del inglés: Erosion-Productivity Impact Calculator)
ERA-Interim	Proyecto de determinación de los parámetros de circulación climática de reanálisis desde 1979 hasta la actualidad desarrollado por el ECMWF
EROSION3D	Modelo de erosión tridimensional
EUROSEM	Modelo de erosión europeo (del inglés: European Soil Erosion Model)
FGOALS1.0_g	Modelo de circulación global del instituto de física atmosférica Chino.
FRCGC	Centro de investigación de cambio climático Japonés, perteneciente a JAMSTEC (del inglés: Frontier Research Center for Global Change)

FSM	Modelo de evaluación de factores de erosión (del inglés: Factorial Scoring Model)
GCM	Modelo de circulación global (del inglés: Global Circulation Model)
GISS	Instituto Goddard para estudios del espacio (del inglés: Goddard Institute for Space Studies)
GISS AOM 4x3	Modelo de circulación global conjunto de la NASA y el GISS
GISS ModelE-H	Modelo de circulación global conjunto de la NASA y el GISS
GISS ModelE-R	Modelo de circulación global conjunto de la NASA y el GISS
GIUZ	Laboratorio de radiocarbono del departamento de geografía de la universidad de Zurich (del inglés: Radiocarbon laboratory of the Department of Geography at the University of Zurich)
GLEAMS	Modelo de simulación de los efectos de la recarga de los acuíferos, en la gestión de sistemas agrícolas (del inglés: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems)
GLM	Modelo lineal generalizado (climático, del inglés: Generalized Linear Model)
GPS	Sistema de Posicionamiento Global (del inglés: Global Positioning System)
HadCM3	Modelo de circulación global del centro Hadley para la predicción e investigación climática, UK
HadGEM1	Modelo de circulación global del centro Hadley para la predicción e investigación climática, UK (del inglés: Hadley Global Environmental Model, version1)
HOPE-G	Modelo de circulación global inter-agencia de origen alemán
HSPF	Modelo hidrológico distribuido, desarrollado por U.S. Environmental protection agency (del inglés: Hydrological Simulation Program - Fortran)
IDF	Curvas de Intensidad Duración Frecuencia que se utilizan para diseñar distintos hietogramas de precipitación en los que el volumen total se mantiene y la intensidad de precipitación depende de la duración de la precipitación considerada.
IGME	Instituto Geológico y Minero de España
IGN	Instituto geográfico nacional
INE	Instituto Nacional de Estadística
INMCM3.0	Modelo de circulación global del instituto de matemática numérica de la academia rusa de ciencias
IntCal_13	Curva de correcciones para la calibración de las dataciones de carbono 14 para el hemisferio Norte, publicada por Reimer et al (2013)
IPCC	Panel intergubernamental sobre el cambio climático (del inglés: Intergovernmental Panel on Climate Change)
IPSL	Instituto Pierre simón Laplace (Francia)
IPSL-CM4	Modelo de circulación global del IPSL Francés
JAMSTEC	Agencia Japonesa para la ciencia y tecnología marina y terrestre (del inglés: Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

KINEROS2	Modelo cinemático de escorrentía y erosión
LASG	Laboratorio de modelización atmosférica y de geofísica de dinámica de fluidos China (del inglés: state key Laboratory numerical modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical fluid dynamics)
LIA	Pequeña edad de hielo (del inglés: Little Ice Age)
LIDAR	Detección y Alcance por Luz (del inglés: Light Detection and Ranging)
LISEM	Modelo de erosión de Limburg (del inglés: Limburg Soil Erosión Model)
LUCDEME	Lucha Contra la Desertificación del Mediterráneo
MAGNA	Mapa geológico nacional
Mark 3.0	Modelo de circulación global desarrollado por el CSIRO
MDT	Modelo digital del Terreno
MEDRUSH	Modelo geográfico-hidrológico de procesos distribuidos, a escala de grandes cuencas
MIKE-SHE	Modelo hidrológico distribuido basado en el sistema hidrológico europeo (SHE)
MIROC3.2	Modelo de circulación global interinstitucional(CCSR, NIES, FRCGC), Japonés (del inglés: Model for Interdisciplinary Research on Climate)
m s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
MRI-CGCM2.3.2	Modelo de circulación global del instituto de investigaciones meteorológicas, perteneciente a la agencia meteorológica Japonesa
NAO	Fenómeno climático consistente en fluctuaciones de la presión atmosférica entre distintos puntos del océano Atlántico (del inglés North Atlantic Oscilation)
NASA	Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio Americana (del inglés: National Aeronautics and Space Administration)
NCAR	Centro nacional americano de investigaciones atmosféricas (del inglés: National Center for Atmospheric Research)
NIES	Instituto nacional de estudios medioambientales Japonés (del inglés: National Institute for Environmental Studies)
NOAA	Agencia oceánica y atmosférica de estados unidos (del inglés: National Oceanic and Atmospheric Administration)
NS	Índice de fiabilidad de modelo hidrológicos de Nash-Sutcliffe
NSF	Fundación nacional para la ciencia, Americana (del inglés: National Science Fundation)
OXCAL	Programa de calibración de las edades de las muestras de carbono 14 desarrollado por Bronk y Ramsey (2009)
PAC	Política agraria común
Pbias	Porcentaje de error medio diario (sesgo) de un modelo hidrológico

PCM	Modelo de circulación global inter-agencia (NASA,NOAA,NCAR,) Americano (del inglés: Parallel Climate Model)
PDOP	Sistema de optimización de la posición por GPS (del inglés: Positional Dilution Of Precision)
PESERA	Modelo europeo de gestión del riesgo de erosión (del inglés: Pan-European Soil Erosion Risk Assessment)
PNOA	Plan Nacional de Ortofotografía Aérea
PORN	Plan de Ordenación de Recursos Naturales
PSIAC	Comité inter-agencia del suroeste pacífico (del inglés: Pacific Southwest Inter-Agency Committee)
Reanálisis	Reconstrucción meteorológico-climática del pasado, utilizando patrones de circulación atmosférica y forzada con datos de observación
RTK	Referido a GPS, Cinemático en Tiempo Real (del inglés: Real Time Kinematic)
RUSLE	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (del inglés: Revised Universal Soil Loss Equation)
SAC-SMA	Modelo hidrológico distribuido, desarrollado por NOAA (del inglés: sacramento - Soil Moisture Accounting)
SAIH	Sistema Automático de Información Hidrográfica
SCE-UA	Algoritmo de calibración automático de modelos, desarrollado por Duan et al. (1992).del inglés (Shuffled Complex Evolution – University of Arizona)
SEDEM	Modelo sedimentológico distribuido (del inglés: sediment delivery Model)
SQRT-ET_{max}	Función de distribución para el cálculo de cuantiles en periodos de retorno en precipitaciones extremas (del inglés: square-root Exponential Type distribution of Maximum)
SRES	Informe especial del IPCC en el que se exponen posibles futuros escenarios de emisión (del inglés: Special Report on Emission Scenarios)
SWAT	Modelo hidrológico distribuido, desarrollado por Texas A&M University, agrilife Research group (del inglés: Soil and Water Assessment Tool)
TETIS	Modelo hidrológico distribuido, desarrollado por El Grupo de investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental de la Universidad Politécnica de Valencia
TETIS-SED	Módulo de simulación sedimentológica del modelo TETIS
TLS	Láser Escáner Terrestre (del inglés: Terrestrial Laser Scanner)
TOPMODEL	Modelo hidrológico basado en la topografía (del inglés: topography MODEL)
USLE	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (del inglés: Universal Soil Loss Equation)
WATEM	Modelo de erosión en función del agua y la gestión de cultivos (del inglés: Water And Tillage Erosion Model)
WEPP	Proyecto de predicción de la erosión (del inglés: Water Erosion Prediction Project)

Glosario de unidades

A continuación se exponen las distintas unidades que se han utilizado en la presente tesis doctoral. En una primera parte se presentan las Magnitudes físicas básicas referidas a la unidad base (UB) de cada magnitud del sistema internacional (SI). en una segunda parte se presentan las magnitudes físicas derivadas referidas a la unidad derivada (UD) de cada magnitud así como su equivalencia respecto a las unidades básicas. Por último se presentan las combinaciones de unidades básicas y derivadas utilizadas, en las que se indica la magnitud que representan.

Magnitud física básica	Unidad	Nombre	valor respecto a UB
Tiempo	s	segundo (UB)	1
	h	hora	3600
	día (o "d")	día	86400
	año (o "a")	año	31536000
Longitud	m	metro (UB)	1
	cm	centímetro	0.01
	mm	milímetro	0.001
	Km	Kilómetro	1000
Temperatura	K	grados Kelvin (UB)	1
	°C	grados centígrados	-272.15
Masa	Kg	kilogramo (UB)	1
	g	gramo	0.001
	t	tonelada métrica	1000

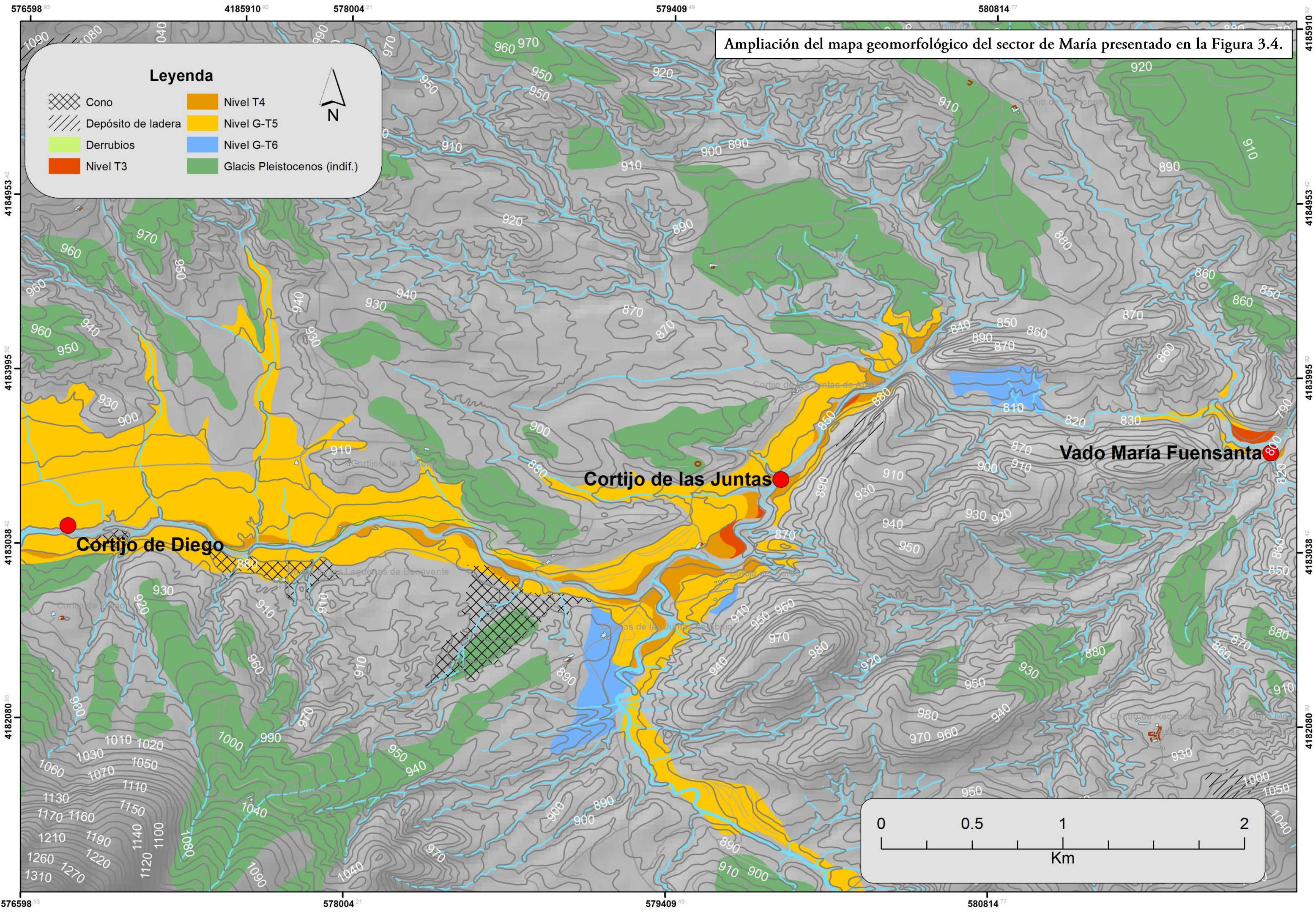
Magnitud física derivada	Unidad	Nombre	valor respecto a UD	Expresión de UD respecto a UB
Área	m ²	metro cuadrado (UD)	1	m ²
	Ha	Hectárea	10000	
	Km ²	Kilómetro cuadrado	1000000	
Volumen	m ³	metro cúbico (UD)	1	m ³
	mm	milímetro (en precipitación)	0.001	
	cm ³	centímetro cúbico	0.000001	
	Hm ³	Hectómetro cúbico	1000000	
Conductividad eléctrica	S	siemens (UD)	1	m ² .kg ⁻¹ .s ³ .A ² *
	μS	microsiemens	0.000001	

* "A" se corresponde a la unidad básica amperio, de la magnitud física de la potencia eléctrica.

Combinación de unidades	Magnitud
m ³ /s	Caudal
mm/h	Precipitación por hora / conductividad hidráulica*
mm/día	Precipitación por día / conductividad hidráulica*
Hm ³ /año	Volumen anual
μS/cm	Conductividad eléctrica en materiales
t/Ha	Erosión
t/Ha*año	Erosión anual
g/cm ³	Densidad
t/m ³	Densidad

* depende si los milímetros se refieren a distancia o a precipitación.

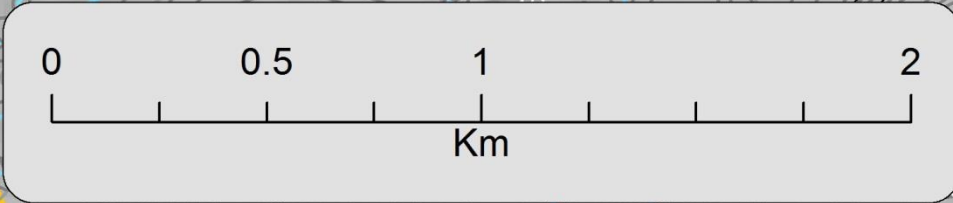
Material complementario

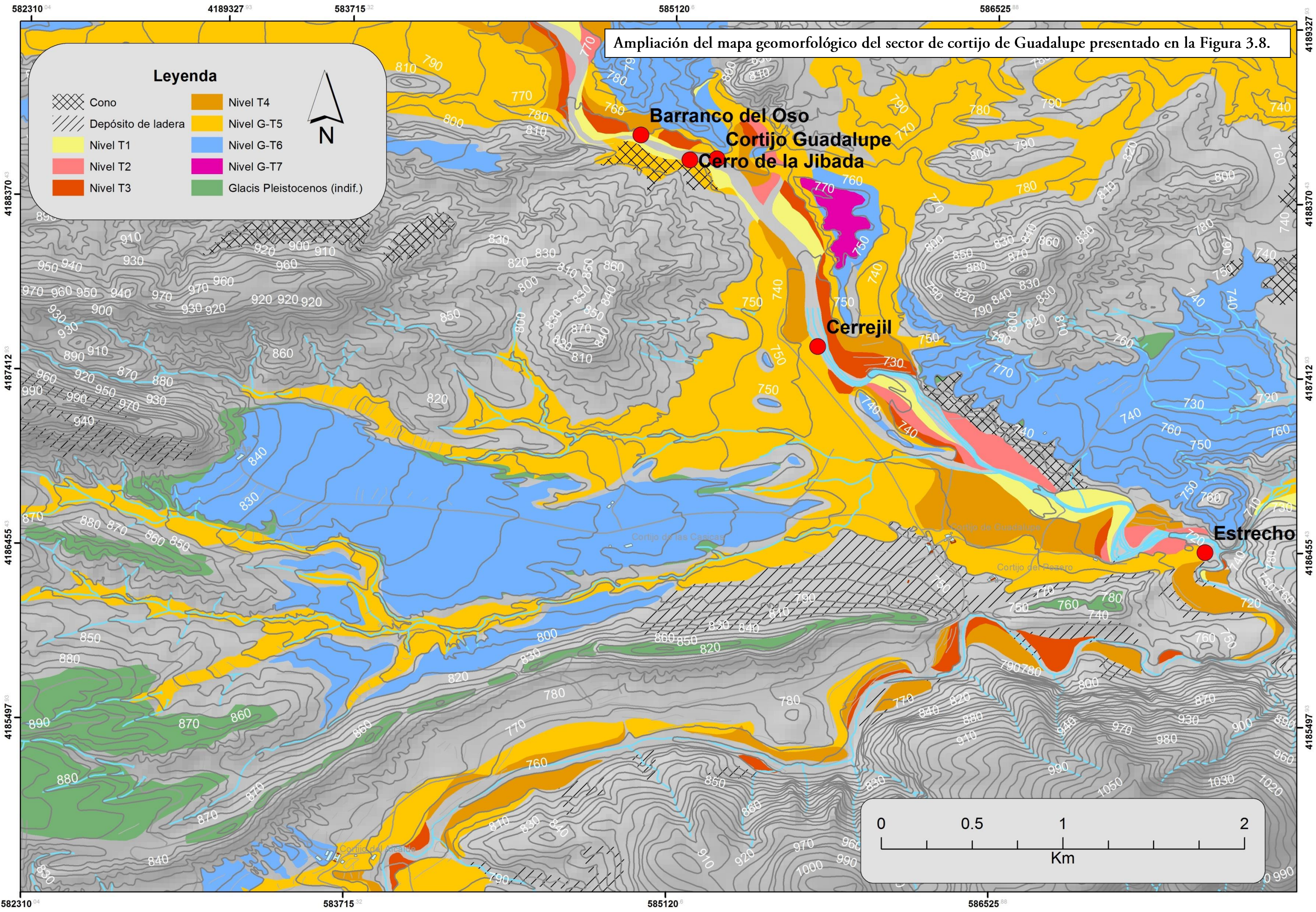


Ampliación del mapa geomorfológico del sector de María presentado en la Figura 3.4.

Leyenda

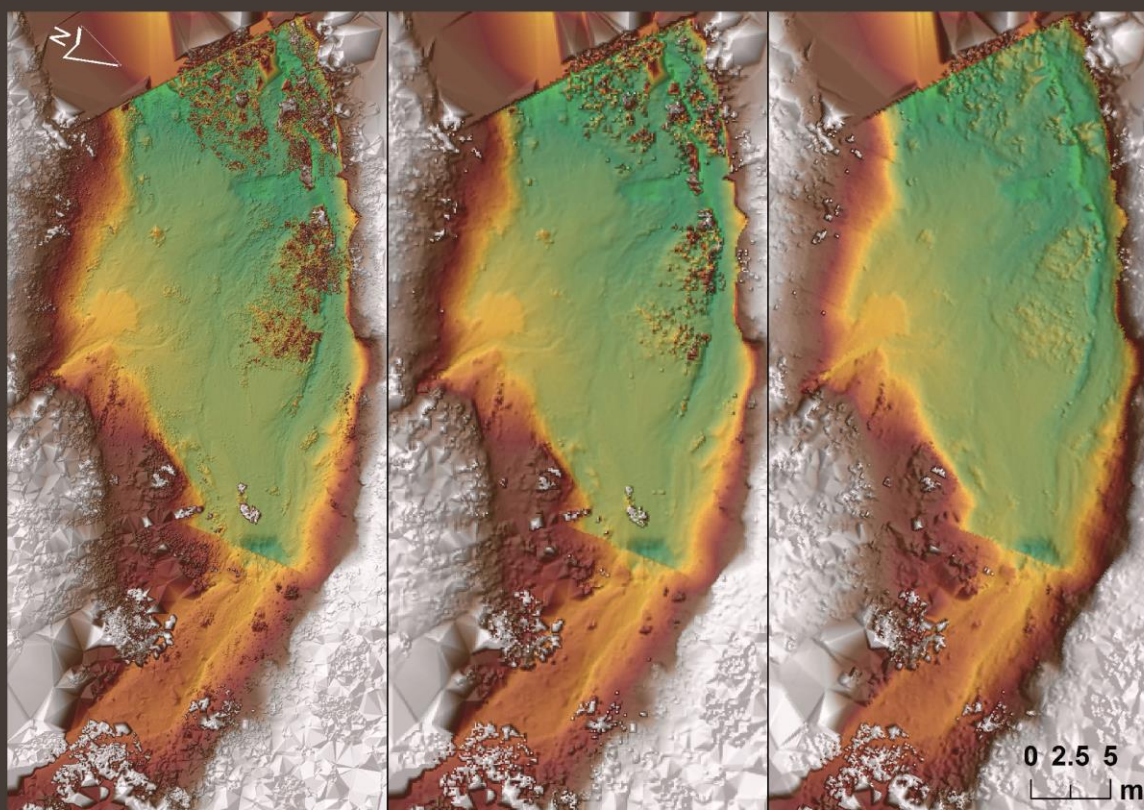
- | | |
|--|--|
|  Cono |  Nivel T4 |
|  Depósito de ladera |  Nivel G-T5 |
|  Derrubios |  Nivel G-T6 |
|  Nivel T3 |  Glacis Pleistocenos (indif.) |





Hidrología y producción de sedimentos a escala decenal y secular de una cuenca mediterránea en respuesta a la variabilidad climática y a los cambios ambientales

Esta tesis doctoral estudia el comportamiento hidrológico, la erosión y el transporte de sedimentos de una cuenca mediterránea durante los últimos 7000 años. A escala milenaria (Holoceno) se han estudiado los rellenos sedimentarios de los fondos de valle, determinando los episodios de actividad fluvial y de estabilidad y formación de paleosuelos. La respuesta hidro-sedimentaria a escala de evento (diaria) se analiza mediante un modelo hidrológico distribuido (TETIS-SED) que se ha aplicado para el periodo histórico (con datos documentales), periodo actual (registro instrumental) y proyecciones futuras en base a escenarios de clima y cambios de uso del suelo. Esta modelización se ha calibrado y validado en base a registros sedimentarios actuales depositados en presas forestales.



Distintos modelos de elevación del terreno resultantes del proceso de filtrado de la señal de la vegetación, que se aplica sobre las medidas tomadas con láser escáner terrestre.